



TUGAS AKHIR - SF141501

**PENUMBUHAN LAPISAN TIPIS SILIKON AMORF  
TERHIDROGENASI ( $\alpha$ -Si:H) TIPE-N DENGAN  
PENGECERAN  $H_2$  MENGGUNAKAN *PLASMA  
ENHANCED CHEMICAL VAPOR DEPOSITION* (PECVD)**

Cahyaning Fajar Kresna Murti  
NRP 1113 100 049

Dosen Pembimbing I  
Prof. Dr. Darminto, M.Sc

Dosen Pembimbing II  
Drs. Yoyok Cahyono, M.Si

Departemen Fisika  
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2017



**TUGAS AKHIR - SF 141501**

**PENUMBUHAN LAPISAN TIPIS SILIKON AMORF  
TERHIDROGENASI (a-Si:H) TIPE-N DENGAN  
PENGECERAN  $H_2$  MENGGUNAKAN *PLASMA  
ENHANCED CHEMICAL VAPOR DEPOSITION* (PECVD)**

**Cahyaning Fajar Kresna Murti  
NRP 1113 100 049**

**Dosen Pembimbing I  
Prof. Dr. Darminto, M.Sc**

**Dosen Pembimbing II  
Drs. Yoyok Cahyono, M.Si**

**Departemen Fisika  
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2017**



**FINAL PROJECT - SF 141501**

**GROWTH OF N-TYPE HYDROGENATED AMORPHOUS  
SILICON (a-Si:H) THIN FILMS WITH H<sub>2</sub> DILUTION  
USING A PLASMA ENHANCED CHEMICAL VAPOR  
DEPOSITION (PECVD)**

**Cahyaning Fajar Kresna Murti  
NRP 1113 100 049**

**Supervisor I  
Prof. Dr. Darminto, M.Sc**

**Supervisor II  
Drs. Yoyok Cahyono, M.Si**

**Physics Departement  
Faculty Matematics and Natural Science  
Sepuluh Nopember Institute of Technology  
Surabaya 2017**

**LEMBAR PENGESAHAN**

**PENUMBUHAN LAPISAN TIPIS SILIKON AMORF  
TERHIDROGENASI (a-Si:H) TIPE-N DENGAN  
PENGECERAN  $H_2$  MENGGUNAKAN *PLASMA  
ENHANCED CHEMICAL VAPOR DEPOSITION (PECVD)***

**TUGAS AKHIR**

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh  
Gelar Sarjana Sains  
pada  
Bidang Studi Material  
Program Studi S-1 Departemen Fisika  
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

**Oleh :**

**Cahyaning Fajar Kresna Murti**  
**1113 100 049**

**Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir :**

**Prof. Dr. Darminto, M.Sc**

**NIP. 19600303 198701.1.002**

**Drs. Yoyok Cahyono, M.Si**

**NIP. 19630127 199002.1.003**

(.....)  
(.....)

**SURABAYA, JANUARI 2017**



**PENUMBUHAN LAPISAN TIPIS SILIKON AMORF  
TERHIDROGENASI (a-Si:H) TIPE-N DENGAN  
PENGECERAN H<sub>2</sub> MENGGUNAKAN *PLASMA  
ENHANCED CHEMICAL VAPOR DEPOSITION (PECVD)***

**Nama** : Cahyaning Fajar Kresna Murti  
**NRP** : 1113 100 049  
**Departemen** : Fisika, FMIPA – ITS  
**Pembimbing** : 1. Prof. Dr. Darminto, M.Sc  
2. Drs. Yoyok Cahyono, M.Si

**Abstrak**

*Lapisan tipis silikon amorf terhidrogenasi (a-Si:H) tipe-n telah dibuat di atas kaca ITO berukuran 10 x 10 cm<sup>2</sup> pada daya 5 Watt, tekanan chamber 530 mTorr dan suhu substrat 270°C menggunakan sistem Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition (PECVD). Proses pendopongan tipe-n dilakukan dengan mengalirkan gas fosfin (PH<sub>3</sub>) ke dalam campuran gas silan (SiH<sub>4</sub>) dan hidrogen (H<sub>2</sub>). Variasi laju gas hidrogen digunakan untuk mengetahui pengaruhnya terhadap tebal, lebar celah pita energi, dan konduktivitas listrik lapisan, dimana masing-masing dikarakterisasi menggunakan AFM, spektrometer UV-Vis, dan metode empat titik. Sementara itu, ikatan molekuler lapisan dikarakterisasi menggunakan FTIR. Ketebalan lapisan a-Si:H tipe-n menurun seiring dengan meningkatnya laju gas H<sub>2</sub> dalam rentang 0-40 sccm. Berbagai macam laju gas H<sub>2</sub> juga berimbas pada perubahan celah pita energi dan konduktivitas listrik lapisan a-Si:H tipe-n.*

**Kata kunci:** *a-Si:H tipe-n, Energi Gap, Tebal, Konduktivitas Listrik, PECVD.*

# **GROWTH OF N-TYPE HYDROGENATED AMORPHOUS SILICON (a-Si:H) THIN FILMS WITH H<sub>2</sub> DILUTION USING A PLASMA ENHANCED CHEMICAL VAPOR DEPOSITION (PECVD)**

**Author : Cahyaning Fajar Kresna Murti**  
**Student Identity : 1113100 049**  
**Department : Physics, Faculty of Mathematics and Sciences -ITS**  
**Supervisor : 1. Prof. Dr. Darminto, M.Sc**  
**2. Drs. Yoyok Cahyono, M.Si**

## **Abstract**

*Thin layers of n-type hydrogenated amorphous silicon (a-Si:H) has been made on ITO glass measuring 10 x 10 cm<sup>2</sup> applying power of 5 watt, chamber pressure of 530 mTorr and a substrate with temperature of 270°C using a system of Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition (PECVD). N-type doping process was carried out by flowing phosphine (PH<sub>3</sub>) gas into the mixture of silane (SiH<sub>4</sub>) and hydrogen (H<sub>2</sub>) gases. The various rate of hydrogen gas was used to determine its effect on the thickness, bandgap, and electrical conductivity of the films, which were characterized respectively using AFM, UV-Vis spectrometer, and a four-point probe method. Meanwhile, molecular bonding in the film was characterized using FTIR. The thickness of n-type a-Si:H film decreases with the increasing rate of H<sub>2</sub> in the range of 0-40 sccm. The varying rate of H<sub>2</sub> has also induced the change in bandgap and electrical conductivity of the films.*

**Keywords:** *a-Si:H n-type, Bandgap, Electrical Conductivity, PECVD, Thickness.*

## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas limpahan rahmat dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Laporan Tugas Akhir sebagai syarat wajib untuk memperoleh gelar Sarjana Sains (S.Si) di Departemen Fisika FMIPA ITS dengan judul:

### **Penumbuhan Lapisan Tipis Silikon Amorf Terhidrogenasi (a-Si:H) Tipe-N dengan Pengenceran $H_2$ Menggunakan *Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition* (PECVD)**

Penulis menyadari dengan terselesaikannya penyusunan tugas akhir ini tidak terlepas dari bantuan dan dukungan dari berbagai pihak, maka pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Prof. Dr. Darminto, M.Sc, selaku dosen pembimbing Tugas Akhir sekaligus dosen wali yang senantiasa memberikan bimbingan, wawasan, pemantauan, dan motivasi sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan baik.
2. Drs. Yoyok Cahyono, M.Si, selaku dosen pembimbing Tugas Akhir yang senantiasa memberikan bimbingan, wawasan, pemantauan, dan motivasi sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan baik.
3. Dr. Yono Hadi Pramono, M. Eng dan Dr. rer. nat Eko Minarto selaku Ketua Jurusan dan Sekretaris Departemen Fisika FMIPA ITS.
4. Prof. Dr. rer. nat Agus Rubiyanto, M. Eng., Sc dan Dr. Malik Anjelh Baqiya, M.Si, selaku dosen penguji Tugas Akhir yang telah memberikan saran, kritik serta

masukannya sehingga banyak menambah wawasan dan meningkatkan kualitas tulisan ini.

5. Dikti yang telah memberikan Beasiswa Bidik Misi kepada penulis selama studi di Fisika FMIPA ITS.
6. Kedua orang tua tercinta, Sabda Yuda Kusuma Dewa dan Sunarti yang senantiasa memberikan do'a serta dukungan moral dan spiritual terhadap keberhasilan penulis menyelesaikan Tugas Akhir ini.
7. Adik-adik tercinta, Betty Pranata Sari yang selalu memberikan semangat dan juga motivasi dalam keberhasilan penulis menyelesaikan Tugas Akhir ini.
8. Keluarga besar yang tidak bisa disebutkan satu-satu namanya yang senantiasa memberikan do'a, dukungan dan motivasi.
9. Bapak Akhida, S.T., selaku operator Lab. Sel Surya di Laboratorium Energi ITS yang telah banyak meluangkan waktu dan memberikan bantuan selama pengerjaan sampel.
10. Tim penelitian Sel Surya dan teman-teman satu dosen pembimbing : Ayunis S, Yuli S, Shelly P. S, Mas Soni P, Mas Nino dan Mas Sholih yang turut menemani dalam suka duka menyelesaikan penelitian ini dan juga memberikan bantuan dalam proses penelitian dan juga analisa data.
11. Bapak Fredi selaku dosen Kimia dan Mbak Kartika yang telah membantu dalam karakterisasi UV-Vis.
12. Seluruh Staf Pengajar di Jurusan Fisika ITS.
13. Segenap teman-teman Fisika 2013 yang senantiasa memberikan waktu luang dikala stress melanda dan senantiasa memberikan dukungan dalam proses



pengerjaan Tugas Akhir ini, serta senantiasa membantu dalam proses belajar di ITS ini.

14. Teman-teman Ristek, Asrofi, Ira, Vinda, Tito, dkk yang telah banyak memberikan pengalaman selama ini.
15. Teman-teman Asisten yang selalu memberikan motivasi dan dukungan dalam menyelesaikan penelitian ini.
16. Mas Aloysius Niko, Mas Rizki Alfirdaus, Mbak Regina Gaby yang telah membantu dalam dalam penulisan laporan Tugas Akhir.
17. Nanda Rico Famas Putra yang selalu setia, mendoakan dan memberikan motivasi serta dukungan hingga saat kelulusanku.
18. Semua pihak yang telah membantu dalam penyelesaian tugas akhir ini yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Penulis menyadari atas keterbatasan ilmu pengetahuan dan kemampuan yang dimiliki, oleh karena itu penulis akan menerima kritik dan saran yang bersifat membangun demi kesempurnaan penulisan Tugas Akhir ini. Semoga Tugas Akhir ini bermanfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan serta memberikan inspirasi bagi pembaca untuk perkembangan lebih lanjut.

Surabaya, Januari 2017

Penulis

***“Halaman ini sengaja dikosongkan”***

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL .....	i
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
ABSTRAK .....	iv
ABSTRACT.....	v
KATA PENGANTAR.....	vi
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR TABEL .....	xiv
DAFTAR LAMPIRAN .....	xvi

### BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
1.6 Sistematika Penulisan.....	3

### BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Bahan Semikonduktor .....	5
2.2 Silikon Amorf Terhidrogenasi (a-Si:H).....	6
2.3 Semikonduktor Non-degeneratif .....	8
2.4 Model Pita Energi a-Si:H .....	10
2.5 a-Si:H Tipe-N .....	12
2.6 Transpor Listrik a-Si:H Tipe-N .....	16
2.7 Deposisi Lapisan a-Si:H dengan PECVD .....	18

### BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Alat dan Bahan .....	21
3.1.1 Alat .....	21
3.1.2 Bahan.....	21
3.2 Langkah Kerja .....	21
3.2.1 Preparasi Sampel .....	21

3.2.2	Proses Deposisi.....	21
3.3	Karakterisasi Sampel .....	22
3.3.1	<i>Fourier Transform Infrared</i> (FTIR) .....	22
3.3.2	<i>Atomic Force Microscopy</i> (AFM) .....	23
3.3.3	<i>Ultraviolet-Visible</i> (UV-Vis).....	24
3.3.4	Metode Empat Titik ( <i>Four Point Probe</i> ).....	25
3.4	Diagram Alir Penelitian.....	26
 <b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN</b>		
4.1	Deposisi Sampel a-Si:H Tipe-N .....	27
4.2	Analisis Ikatan Molekuler Lapisan a-Si:H Tipe-N.....	29
4.3	Analisis Ketebalan Lapisan a-Si:H Tipe-N .....	31
4.4	Analisis Lebar Celah Pita Energi ( <i>Bandgap</i> ).....	34
4.5	Analisis Konduktivitas Listrik a-Si:H Tipe-N.....	38
 <b>BAB V KESIMPULAN</b>		
5.1	Kesimpulan.....	43
5.2	Saran.....	43
 <b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>		<b>45</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>		<b>47</b>
<b>BIODATA PENULIS.....</b>		<b>59</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Pita Energi pada Semikonduktor .....	5
Gambar 2.2	Struktur Atom (a) Silikon Kristal Tunggal dan (b) Silikon Amorf Terhidrogenasi.....	6
Gambar 2.3	Pengaruh Kandungan Hidrogen dalam Silikon Amorf terhadap Rapat Keadaan .....	7
Gambar 2.4	Skema Pita Energi Semikonduktor Ekstrinsik.....	9
Gambar 2.5	(a) Model Diagram Orbital Silikon Amorf (b) Distribusi Rapat Keadaan .....	12
Gambar 2.6	Grafik Hubungan Konduktivitas Listrik terhadap Perbandingan Fraksi Fosfor dalam Silikon .....	13
Gambar 2.7	Konfigurasi atom P dalam Silikon Amorf.....	14
Gambar 2.8	Skema Ikatan P-H.....	15
Gambar 2.9	Model Mikroskopis Pemasifan Konfigurasi $P_4^+$ menjadi $P_3^0$ .....	16
Gambar 2.10	Rentang Nilai Konduktivitas.....	17
Gambar 2.11	Skema Sistem PECVD .....	19
Gambar 3.1	Skema Kerja FTIR .....	23
Gambar 3.2	Metode Penentuan Tebal Lapisan dengan AFM ...	23
Gambar 3.3	Metode Penentuan Energi Gap Optik.....	24
Gambar 3.4	Penempatan Probe dengan Metode FPP untuk Sampel Persegi.....	25
Gambar 3.5	Diagram Alir Pembuatan Lapisan a-Si:H Tipe-N.	26
Gambar 4.1	Lapisan Hasil Deposisi.....	28
Gambar 4.2	Spektrum FTIR Lapisan a-Si:H Tipe-N .....	30
Gambar 4.3	Grafik Pengaruh Laju $H_2$ terhadap Ketebalan .....	32
Gambar 4.4	Tebal Lapisan Akibat Pengaruh laju $H_2$ .....	33
Gambar 4.5	Grafik Laju Deposisi .....	34
Gambar 4.6	Grafik Pengaruh Laju $H_2$ terhadap Energi Gap.....	35
Gambar 4.7	Pergeseran <i>Bandgap</i> Akibat pengaruh Penambahan $H_2$ .....	37
Gambar 4.8	Grafik Pengaruh Laju $H_2$ terhadap Konduktivitas Listrik.....	40

Gambar 4.9 Ilustrasi Tingkat Energi a-Si:H Tipe-n Sebagai Akibat Pengaruh Laju $H_2$ .....	40
--------------------------------------------------------------------------------------------	----

## DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Parameter Deposisi Lapisan a-Si:H Tipe-n. ....	22
Tabel 4.1	Data Spektroskopi FTIR Lapisan a-Si:H Tipe-n ...	31
Tabel 4.2	Hasil Pengukuran Konduktivitas Listrik. ....	39

***“Halaman ini sengaja dikosongkan”***



## **DAFTAR LAMPIRAN**

Lampiran A	Hasil Pengukuran Ketebalan dengan AFM .....	47
Lampiran B	Hasil Pengukuran Spektrometer UV-Vis .....	53
Lampiran C	Pengukuran Konduktivitas Listrik.....	57

***“Halaman ini sengaja dikosongkan”***

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Teknik deposisi merupakan salah satu cara populer untuk membuat a-Si:H yang bertujuan untuk menghasilkan bahan dengan sifat optolistrik yang baik dan celah pita optik yang lebih tinggi. Silikon amorf menjadi bahan penelitian yang sekarang ini banyak dikembangkan dalam penelitian sel surya dikarenakan biaya produksi yang relatif murah sedangkan efisiensi yang dicapai cukup memuaskan. Silikon amorf sampai saat ini masih dikembangkan teknik pembuatannya untuk memperoleh efisiensi yang tinggi. Efisiensi awal sekitar 2-3% dicapai di laboratorium untuk sambungan tunggal, selanjutnya naik hingga 13% dengan *multiple structure* serta paduan silikon. Kunci utama untuk mendapatkan nilai efisiensi yang tinggi adalah dengan mencari nilai yang tepat untuk material tipe p dan n (Shockley, 1996).

Dalam pengembangannya menjadi sel surya p-i-n, silikon amorf didoping untuk menjadi lapisan tipis silikon amorf tipe-p maupun tipe-n. Namun, rapat keadaan terlokalisasi yang tinggi dalam silikon amorf menyebabkan proses pendopingan menjadi kurang efektif. Tetapi rapat keadaan terlokalisasi tersebut dapat diturunkan dengan cara penambahan gas hidrogen atau yang biasa disebut dengan proses hidrogenasi (Takahashi, 1986). Proses deposisi dengan menggunakan gas hidrogen akan menghasilkan silikon amorf terhidrogenasi (a-Si:H). Salah satu metode yang digunakan dalam penumbuhan lapisan tipis a-Si:H yaitu metode sistem *Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition* (PECVD). Proses penumbuhan lapisan tipis dilakukan dengan gas silan ( $\text{SiH}_4$ ) dan hidrogen ( $\text{H}_2$ ) sebagai sumber gas, dimana untuk lapisan tipis tunggal tipe-p dan tipe-n diberikan dopan berupa pencampuran gas diboran ( $\text{B}_2\text{H}_6$ ) untuk lapisan tipe-p dan gas fosfin ( $\text{PH}_3$ ) untuk lapisan tipe-n ke dalam sumber gas.

Konduktivitas listrik, ketebalan lapisan dan celah pita terlarang menjadi parameter terpenting dalam sel surya p-i-n karena ketiga parameter tersebut saling mempengaruhi satu sama lain, sehingga masing-masing lapisan akan mempengaruhi dalam struktur p-i-n (Yahya, dkk, 1984). Maka dari itu harus diperhatikan kualitas dari masing-masing lapisan (tipe-p, tipe-i dan tipe-n) sehingga akan diperoleh kondisi optimum dari masing-masing lapisan sehingga efisiensi yang dihasilkan dalam penerapan sel surya akan meningkat. Optimalisasi lapisan tipis tunggal a-Si:H tipe-n menjadi fokus pada penelitian ini. Dimana kualitas dari lapisan yang ditumbuhkan dengan teknik sistem PECVD bergantung pada parameter penumbuhannya, yaitu antara lain temperatur substrat, mobilitas radikal di permukaan penumbuhan, tekanan *chamber*, laju aliran gas, daya rf. Selain itu optimalisasi lapisan tipis tunggal a-Si:H tipe-n juga dapat dicapai apabila konduktivitas listriknya tinggi dan celah pita optik terlarang lebih lebar dari lapisan intrinsik tipe-i (Takahashi, 1986). Melalui optimalisasi parameter-parameter deposisi sistem PECVD yang meliputi laju gas hidrogen, maka diharapkan dapat menghasilkan lapisan tipis tunggal a-Si:H tipe-n dengan kualitas yang optimum sehingga dapat diaplikasikan sebagai bahan sel surya berbasis a-Si:H struktur p-i-n.

## 1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, permasalahan yang akan dibahas pada penelitian ini adalah

1. Bagaimana ikatan molekuler yang terbentuk pada lapisan a-Si:H tipe-n?
2. Bagaimana pengaruh laju gas hidrogen ( $H_2$ ) terhadap tebal lapisan a-Si:H tipe-n?
3. Bagaimana pengaruh laju gas hidrogen ( $H_2$ ) terhadap lebar celah pita energi lapisan tipis a-Si:H tipe-n?
4. Bagaimana pengaruh laju gas hidrogen ( $H_2$ ) terhadap konduktivitas listrik lapisan a-Si:H tipe-n?

### 1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan yang hendak dicapai dalam penelitian tugas akhir ini adalah

1. Mengetahui ikatan molekuler yang terbentuk pada lapisan a-Si:H tipe-n.
2. Mengetahui pengaruh laju gas hidrogen ( $H_2$ ) terhadap tebal lapisan tipis a-Si:H tipe-n.
3. Mengetahui pengaruh laju gas hidrogen ( $H_2$ ) terhadap lebar celah pita energi lapisan tipis a-Si:H tipe-n.
4. Mengetahui pengaruh laju gas hidrogen ( $H_2$ ) terhadap konduktivitas listrik lapisan tipis a-Si:H tipe-n.

### 1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian tugas akhir ini adalah

1. Deposisi lapisan tipis tunggal a-Si:H tipe-n dilakukan menggunakan sistem PECVD.
2. Deposisi lapisan tipis a-Si:H tipe-n menggunakan gas prekursor  $SiH_4$  (Silan),  $PH_3$  (Fosfin) dan  $H_2$  (Hidrogen).
3. Substrat yang digunakan dalam penumbuhan lapisan tipis tunggal a-Si:H tipe-n adalah kaca ITO berukuran  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ .
4. Besar celah pita energi dikarakterisasi dengan UV-Vis dan metode *Tauc's Plot*.
5. Karakterisasi lainnya menggunakan AFM, FTIR dan metode empat titik (*Four Point Probe*).

### 1.5 Manfaat penelitian

Manfaat dari penelitian tugas akhir ini adalah dapat memberikan pemahaman tentang kualitas optimum dari lapisan tipis tunggal a-Si:H tipe-n serta dapat diaplikasikan sebagai bahan sel surya struktur p-i-n.

### 1.6 Sistematika Penulisan

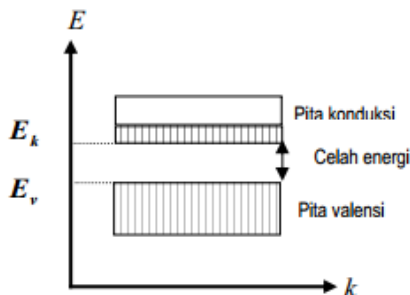
Sistematika penulisan laporan tugas akhir ini dapat diuraikan sebagai berikut:

1. Bab I – Pendahuluan, berisi uraian mengenai latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan laporan penelitian.
2. Bab II – Tinjauan Pustaka, berisi uraian mengenai teori yang mendukung analisis.
3. Bab III – Metodologi Penelitian, berisi waktu dan tempat penelitian, data penelitian, alat yang digunakan dalam penelitian, serta uraian mengenai metode-metode dan tahapan-tahapan yang dilakukan selama penelitian.
4. Bab IV – Analisa Data dan Pembahasan, menjelaskan tentang hal-hal yang didapat selama penelitian, hal ini berkaitan dengan pengaruh penambahan hidrogen ( $H_2$ ) terhadap besar celah pita terlarang dan kualitas lapisan tipis yang terbentuk dari proses deposisi serta ikatan-ikatan yang terbentuk pada lapisan tipis tunggal a-Si:H tipe-n.
5. Bab V– Penutup, berisi uraian mengenai simpulan dari hasil analisa data dan pembahasan serta saran-saran untuk mendukung hasil penelitian.
6. Lampiran, berisi data – data yang digunakan dalam penelitian beserta beberapa gambar yang menunjang penelitian ini.

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Bahan Semikonduktor

Jenis-jenis material dalam zat padat dapat dikelompokkan menjadi 3 (tiga) yaitu konduktor, semikonduktor dan isolator. Dimana nilai konduktivitas listrik semikonduktor berada diantara isolator dan konduktor. Bahan semikonduktor akan bersifat sebagai konduktor pada temperatur ruang, namun akan bersifat sebagai isolator pada temperatur yang sangat rendah. Bahan semikonduktor sangat berguna dalam bidang elektronik dikarenakan nilai konduktivitasnya yang dapat diubah-ubah dengan cara menyuntikkan materi lain (*doping*). Konduktivitas listrik dari bahan semikonduktor sensitif terhadap temperatur, penyinaran, medan magnet dan jumlah atom impuritas. Bahan semikonduktor memiliki celah pita energi dengan orde sekitar 1 eV (Frank, 2007).



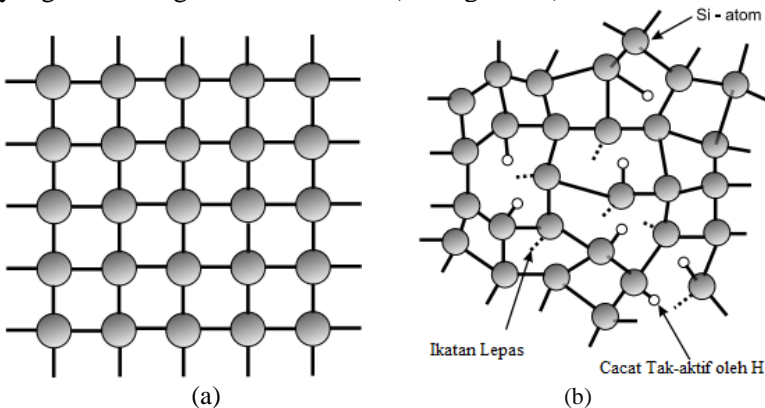
**Gambar 2.1** Pita Energi pada Semikonduktor (Solomon, 2012).

Menurut teori pita energi, pada  $T = 0 \text{ K}$  pita valensi semikonduktor akan terisi penuh oleh elektron, sedangkan pita konduksi kosong. Apabila mendapatkan cukup energi, misalnya berasal dari energi panas atau yang berarti pada suhu kamar ( $kT = 0,026 \text{ eV}$ ) maka elektron dapat melepaskan diri dari ikatan kovalen dan tereksitasi menyebrangi celah energi. Dengan

demikian, dasar dari pita konduksi dihuni oleh elektron dan puncak dari pita valensi dihuni oleh *hole* (Solomon, 2012).

## 2.2 Silikon Amorf Terhidrogenasi (a-Si:H)

Struktur atom penyusun silikon amorf berbeda dari silikon kristal. Di dalam silikon kristal atom-atom tersusun secara merata dan memiliki keteraturan, tersusun secara periodik dan berjangkauan panjang. Gambar 2.2(a) menunjukkan skema struktur silikon kristal tunggal dimana setiap atom silikon berikatan secara kovalen dengan empat atom silikon lainnya, dimana setiap ikatan memiliki panjang dan sudut ikatan yang sama. Sedangkan atom-atom dalam silikon amorf tidak memiliki keteraturan dan berjangkauan pendek. Namun, konfigurasi atom-atom silikon yang berikatan kovalen dengan keempat atom silikon lainnya atau salah satu atom lain memiliki konfigurasi yang sama dengan silikon kristal (Huang, 2012).



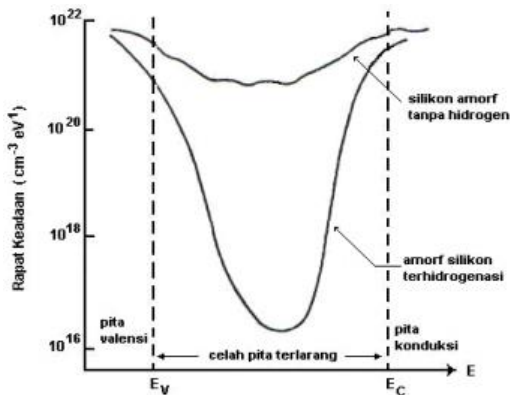
**Gambar 2.2** Struktur atom (a) Silikon kristal tunggal (b) Silikon amorf terhidrogenasi (Smets, 2001).

Terdapatnya beberapa hal keunggulan material a-Si:H dibandingkan dengan kristal silikon menyebabkan penelitian tentang material ini terus dikembangkan. Keunggulan tersebut diantaranya energi *bandgap* yang mudah dikontrol (1,65-1,8 eV), temperatur penumbuhan yang relatif rendah dibawah 500°C



(untuk penumbuhan kristal  $\sim 1450^\circ\text{C}$ ) dan absorpsi cahaya yang cukup tinggi. Pengaruh kandungan hidrogen dalam proses penumbuhan menyebabkan tingkat kecacatan bergerak masuk ke pita konduksi dan valensi, sehingga kerapatan keadaan (*state density*) berkurang secara tajam, seperti pada gambar 2.3. Maka dari itu energi *bandgap* sangat dipengaruhi oleh kandungan hidrogen dan adanya defek pada lapisan tipis a-Si:H (Smets, 2001).

Penyimpangan atau tidak samanya panjang dan sudut ikatan antara atom-atom silikon amorf menyebabkan ikatan-ikatan antar atom lemah dan mudah terlepas apabila diberikan sejumlah energi tertentu yang akan menyebabkan terjadinya cacat pada jaringan atom. Pada silikon amorf, terjadinya cacat disebabkan atom silikon amorf hanya memiliki tiga ikatan dan satu elektron yang tidak berpasangan. Ikatan yang kosong tersebut disebut *dangling bond* (Evin, 2009).



**Gambar 2.3** Pengaruh kandungan hidrogen dalam silikon amorf terhadap rapat keadaan (Street, 1991).

Munculnya *dangling bond* pada silikon amorf merupakan akibat dari tidak berikatannya semua atom silikon dengan atom terdekatnya. Adanya *dangling bond* menyebabkan atom silikon tidak berikatan dengan sesama atom silikon. Namun *dangling*

*bond* ini dapat dipasifkan dengan hidrogen melalui metode hidrogenasi, sehingga disebut dengan silikon amorf terhidrogenasi. Dalam silikon amorf yang tidak mengandung hidrogen, *dangling bond* muncul sebesar 1% dari kerapatan atom silikon (Gambar 2.3). Ketika atom-atom hidrogen yang berikatan dengan silikon maka rapat keadaan terlokalisasinya menurun secara drastis hingga kisaran  $10^{15} \text{ cm}^{-3} \text{ eV}^{-1}$  (Street, 1991).

### 2.3 Semikonduktor Non-degeneratif

Pada tingkat-tingkat donor dalam silikon, terdapat energi termal yang cukup bagi energi donor ( $E_D$ ) untuk mengionisasi semua impuritas donor pada suhu kamar dan selanjutnya akan memberikan sejumlah elektron di pita konduksi. Kondisi ini disebut sebagai ionisasi sempurna, rapat elektron dapat dituliskan sebagai (Sze, 2002).

$$n = N_D \quad (2.1)$$

dimana  $N_D$  adalah konsentrasi donor. Gambar 2.3(a) menunjukkan kondisi ionisasi sempurna dimana tingkat donor  $E_D$  diukur dari tepi bawah pita konduksi dan setara dengan konsentrasi elektron dan ion donor. Tingkat energi Fermi berkaitan dengan rapat keadaan efektif di pita konduksi  $N_C$  dan konsentrasi donor  $N_D$  dapat dinyatakan sebagai (Sze, 2002).

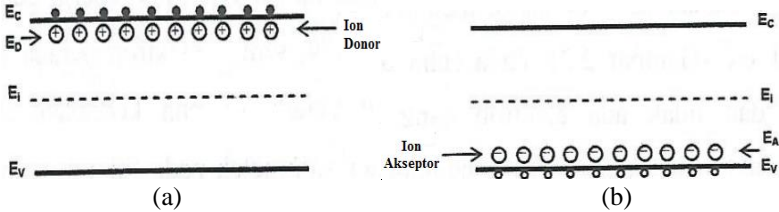
$$N_C - E_F = kT(N_C/N_D) \quad (2.2)$$

Tingkat-tingkat akseptor (Gambar 2.3 b), saat terjadi ionisasi sempurna maka konsentrasi *hole* dapat dituliskan sebagai (Sze, 2002).

$$p = N_A \quad (2.3)$$

Dimana  $N_A$  merupakan konsentrasi akseptor. Tingkat energi Fermi berkaitan dengan rapat keadaan efektif di pita valensi  $N_V$  dan konsentrasi akseptor  $N_A$  dapat dinyatakan sebagai (Sze, 2002).

$$N_F - N_V = kT(N_V/N_A) \quad (2.4)$$



**Gambar 2.4** Skema pita energi semikonduktor ekstrinsik dengan (a) ion-ion donor (b) ion-ion akseptor (Sze, 2002).

Gambar 2.4 memperlihatkan bahwa semakin tinggi konsentrasi donor maka semakin kecil perbedaan energi ( $E_C - E_F$ ) sehingga tingkat energi Fermi akan bergerak mendekati pita konduksi. Hal yang sama terjadi jika konsentrasi akseptor semakin tinggi maka tingkat energi Fermi akan bergerak menuju pita valensi.

Rapat elektron dan *hole* dalam betuk konsentrasi pembawa muatan intrinsik  $n_i$  dan tingkat energi Fermi intrinsik  $E_i$  dapat dituliskan sebagai (Sze, 2002).

$$n = n_i \exp[(E_F - E_i)/kT] \quad (2.5)$$

$$p = n_i \exp[(E_i - E_F)/kT] \quad (2.6)$$

Hasil perkalian dari  $n$  dan  $p$  pada kedua persamaan di atas sama dengan  $n_i^2$ . Hasil ini identik dengan kasus semikonduktor intrinsik. Pada semikonduktor ekstrinsik, tingkat energi Fermi bergerak mendekat baik ke pita konduksi (tipe-n) ataupun pita valensi (tipe-p). Salah satu pembawa muatan tipe-n maupun tipe-p kemudian yang akan dominan, namun produk kedua tipe pembawa muatan akan tetap ada temperatur tertentu.

Jika impuritas donor ataupun akseptor sama-sama hadir, maka impuritas yang muncul dalam konsentrasi lebih besar yang

akan menentukan tipe konduktivitas di dalam semikonduktor. Tingkat energi Fermi kemudian akan menyesuaikan untuk menjaga penetralan muatan, maka dari itu total muatan negatif (elektron dan akseptor terionisasi) harus sama dengan total muatan positif (*hole* dan donor terionisasi). Pada keadaan terionisasi sempurna, dapat dinyatakan sebagai (Sze, 2002).

$$n + N_A = p + N_D \quad (2.7)$$

Maka pada keadaan seimbang, konsentrasi elektron dan *hole* di dalam semikonduktor tipe-*n* adalah (Sze, 2002).

$$n_n = \frac{1}{2} \left[ (N_D - N_A) + \sqrt{(N_D - N_A)^2 + 4n_i^2} \right] \quad (2.8)$$

$$p_n = n_i^2 / n_n \quad (2.9)$$

Indeks *n* menunjukkan pada semikonduktor tipe-*n*. Pada tipe-*n*, elektron adalah pembawa muatan yang dominan sehingga disebut *majority carrier* sedangkan *hole* pada semikonduktor tipe-*n* disebut sebagai *minority carrier*. Sedangkan pada semikonduktor tipe-*p*, konsentrasi *hole* dan elektron dituliskan sebagai (Sze, 2002).

$$p_p = \frac{1}{2} \left[ (N_A - N_D) + \sqrt{(N_D - N_A)^2 + 4n_i^2} \right] \quad (2.10)$$

$$n_p = n_i^2 / p_p \quad (2.11)$$

Indeks *p* mengacu pada semikonduktor tipe-*p*.

## 2.4 Model Pita Energi a-Si:H

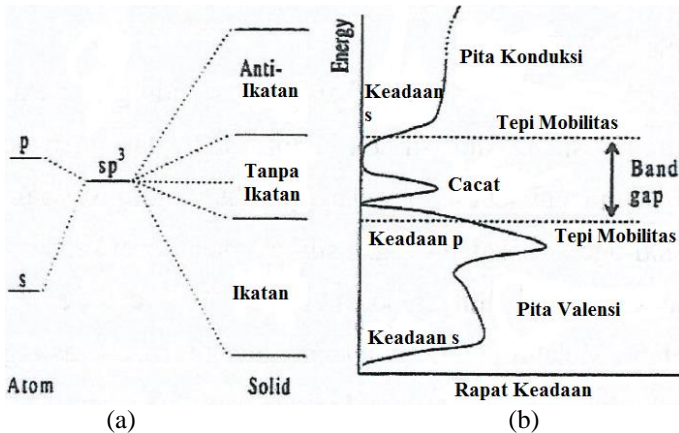
Lapisan tipis silikon amorf terhidrogenasi (a-Si:H) dapat dibuat menjadi lapisan tipis tipe-*n* menggunakan teknik penumbuhan lapisan (deposisi) dengan menambahkan gas fosin

( $\text{PH}_3$ ) ke dalam campuran gas silan ( $\text{SiH}_4$ ) dan gas hidrogen ( $\text{H}_2$ ) sebagai ketidakmurnian. Penambahan gas fosfin berfungsi sebagai gas *dopan* yang dimaksudkan untuk memanipulasi tipe konduktivitas listriknnya. Selain sifat listrik dari lapisan tipis, sifat optik dari lapisan tersebut juga harus diperhatikan. Salah satu sifat optik yang perlu diperhatikan yaitu *bandgap*. *Bandgap* sangat menentukan sifat-sifat dari semikonduktor diantaranya mobilitas pembawa muatan dalam semikonduktor, kerapatan pembawa muatan dan spektrum absorpsi (Evin, 2009).

Penentuan *bandgap* dapat dilakukan dengan melakukan penyinaran dengan gelombang elektromagnetik (foton dengan energi tertentu) sehingga elektron dapat menyerap energi dari foton dan akan berpindah atau melompat menuju tingkat energi yang lebih tinggi yaitu elektron berpindah dari pita valensi ke pita konduksi. Seiring meningkatnya konsentrasi gas fosfin, maka tingkat energi Fermi tidak dapat bergerak lebih dekat lagi pada pita konduksi melebihi 0,15 eV (Poortmans, 2006). Keberadaan ekor pita dan rapat keadaan cacat pada celah pita energi menghalangi pergeseran tingkat energi Fermi menuju tepi pita. Struktur *continuous random network* dipercaya mudah untuk mengikat atom-atom ketidakmurnian seperti fosfor. Dengan suatu koordinasi yang bersesuaian dengan konfigurasi ikatan atom-atom ketidakmurnian pada tingkat energi terendah. Oleh karena itu atom-atom fosfor masuk dalam *continuous random network* silikon amorf dengan berbagai kemungkinan koordinasi. Proses hidrogenasi pada a-Si:H tipe-n dapat menyebabkan pendopongan menjadi tidak efektif. Atom hidrogen dapat masuk secara interstisi dalam a-Si:H ekstinsik dan mampu mempasifkan atom-atom dopan (Cabarrocas, 1997).

Sebuah model yang menggambarkan pemisahan orbital pada silikon amorf data dilihat pada Gambar 2.5. Orbital s dan p bergabung menjadi orbital hibridisasi  $\text{sp}^3$ . Kemudian orbital tersebut terbelah karena interaksi-interaksi dalam ikatan sehingga menghasilkan pita valensi dan pita konduksi. Orbital silikon

yang tidak terlibat dalam ikatan (*dangling bond*), tetap berada di celah pita terlarang sebagai *defect* (Street, 1991).



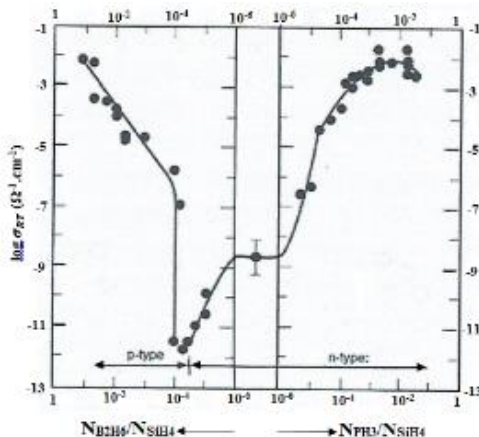
**Gambar 2.5** (a) Model Diagram Orbital Silikon Amorf, (b) Distribusi Rapat Keadaan yang Muncul dari Model (Poortmans, 2006).

Pendopongan pada bahan silikon amorf terhidrogenasi (a-Si:H) menciptakan dua perubahan penting dalam distribusi keadaan. Pertama, terdapat jumlah rapat keadaan cacat (*defect states*) yang lebih lebar di celah mobilitas. Kedua, tingkat energi Fermi bergeser ke arah pita konduksi. Sehingga sifat transport listrik dari bahan akan banyak terpengaruh (Street, 1991).

## 2.5 a-Si:H Tipe-N

Lapisan tipis a-Si:H dapat dibuat menjadi tipe-n dengan menambahkan gas fosfin ke dalam campuran gas silan dan hidrogen sebagai ketidakmurnian. Tujuan melakukan pendopongan adalah untuk memanipulasi tipe konduktivitas listrik. Gambar 2.6 menunjukkan hubungan antara konduktivitas listrik pada suhu kamar ( $\sigma_{RT}$ ) sebagai fungsi fraksi gas *dopant* dalam gas silan. Nilai konduktivitas gelap pada suhu kamar di kisaran orde  $10^{-2}$  S/cm merupakan kisaran minimum yang dapat dicapai a-Si:H tipe-n. Nilai ini enam lebih kecil dari yang dapat

dicapai silikon kristal (Street, 2000). Terdapat beberapa alasan yang menyebabkan rendahnya konduktivitas tersebut, diantaranya ialah mobilitas pembawa muatan yang rendah dan efisiensi pendopongan yang rendah. Pada silikon kristal, mobilitas pembawa muatan elektron mencapai  $1350 \text{ cm}^2/\text{V.s}$  (Takahashi, 1986). Sedangkan pada silikon amorf mobilitas elektron turun drastis menjadi hanya  $10\text{-}20 \text{ cm}^2/\text{V.s}$  (Poortmans, 2006). Efisiensi pendopongan pada a-Si:H sangat rendah berkisar  $10^{-1}$  saat didoping rendah dan turun menjadi  $10^{-3}$  saat didoping tinggi (Street, 2000).



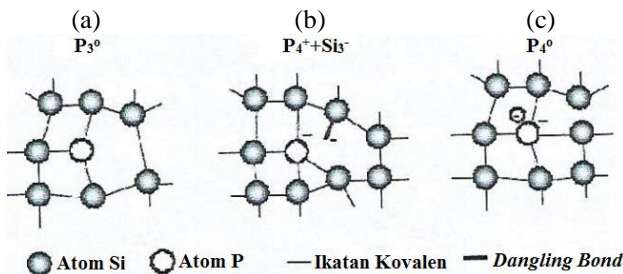
**Gambar 2.6** Grafiik hubungan konduktivitas listrik pada suhu kamar terhadap perbandingan fraksi fosfin dalam silan (Poortmans, 2006).

Struktur *continuous random network* diyakini mudah untuk mengikat atom-atom ketidakmurnian seperti fosfor dan boron, dengan suatu koordinasi yang bersesuaian dengan konfigurasi ikatan atom-atom ketidakmurnian pada tingkat energi terendah. Karakteristik silikon amorf ini berbeda dengan silikon kristal dimana atom-atom ketidakmurnian mengikuti koordinasi atom silikon. Namun pada silikon amorf, bilangan koordinasi optimum  $Z$  untuk sebuah atom dengan  $N$  elektron valensi adalah (Poortmans, 2006).

$$Z = 8 - N \quad \text{untuk } N \geq 4 \quad (2.12)$$

$$Z = N \quad \text{untuk } N < 4 \quad (2.13)$$

Prediksi mengenai koordinasi atom pada struktur jaringan acak berkelanjutan tersebut dikenal dengan kaidah 8-N oleh Mott (1969). Oleh karena itu atom-atom fosfor masuk dalam *continuous network random* silikon amorf dengan beragam kemungkinan koordinasi.



**Gambar 2.7** Konfigurasi yang mungkin bagi sebuah atom P dalam struktur silikon amorf (a) Keadaan *nondoping*  $P_3^\circ$ , (b) Keadaan *compensated donor*  $P_4^+ + Si_3^-$ , (c) Donor netral  $P_4^\circ$  (Poortmans, 2006).

Sebuah atom fosfor dengan lima elektron valensi akan berikatan dengan atom silikon dengan membentuk tiga ikatan kovalen (Gambar 2.7 (a)). Keadaan  $P_3^\circ$  menyatakan sebuah atom fosfor yang memiliki tiga ikatan kovalen dengan muatan netral. Dalam a-Si:H, hampir semua atom-atom fosfor yang terikat mengikuti kaidah 8-N. Sebuah atom fosfor juga dapat terikat dalam jaringan silikon amorf sebagai donor netral  $P_4^\circ$ , namun konfigurasi seperti ini membutuhkan energi yang lebih tinggi dibandingkan konfigurasi  $P_3^\circ$  dan tidak stabil. Sebagian besar atom fosfor yang berperan dalam proses pendopongan merupakan keadaan  $P_4^+$  yang disebut dengan *compensated donor*. Formasi keadaan  $P_4^+$  disertai dengan formasi *dangling bond* negative  $Si_3^-$  (Gambar 2.7 (b)) dan merupakan mekanisme pengotoran yang utama dalam a-Si:H. (Street, 2000) menjelaskan mekanisme

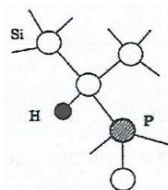


tersebut sebagai model *autocompensation*. Hasil terpenting menurut model ini yakni proses pendopongan pada a-Si:H menyebabkan terciptanya *dangling bond* sehingga rapat keadaan cacat a-Si:H ekstrinsik sekitar dua orde lebih besar dibandingkan dengan a-Si:H intrinsik. Maka dari itu, proses deposisi yang menggunakan gas hidrogen ( $H_2$ ) dalam gas silan ( $SiH_4$ ) diharapkan mampu menurunkan rapat keadaan cacat di pita terlarang.

Namun, proses hidrogenasi pada a-Si:H tipe-n menyebabkan pendopongan menjadi kurang efektif. Chen (1993) menyatakan bahwa, atom hidrogen dapat masuk secara interstisi dalam a-Si:H ekstrinsik dan mampu mempasifkan atom-atom dopan. Rapat muatan pembawa pada ekor pita dikontrol oleh pasivasi dan reaktivasi atom-atom dopan oleh interstitial hidrogen tanpa mengubah *dangling bond* menurut reaksi (Chen, 1993).



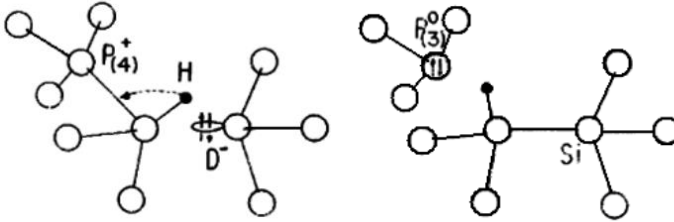
Ikatan P-H secara eksperimen diamati memiliki jarak sebesar 2,4 Å dan sepertinya terlalu besar jika ingin diasumsikan adanya ikatan P-H langsung sebesar 1,4 Å seperti ikatan Si-H. Interpretasi yang mungkin adalah atom hidrogen berikatan secara *back-bond* pada sebuah atom Si yang paling dekat dengan sebuah atom P (Gambar 2.8)



**Gambar 2.8** Skema ikatan P-H (Fritzsche, 1998).

Sebuah mekanisme pasifasi konfigurasi dopan aktif dapat dilihat pada Gambar 2.9. Sebuah atom fosfor dengan ikatan rangkap empat ( $P_4^+$ ) dan sebuah *dangling bond* ( $D^\cdot$ ) seperti pada

Gambar 2.9 (a), ikatan Si-P putus dan atom P berubah menjadi ikatan keadaan  $P_3^0$ . Kemudian atom H dapat berdifusi menuju *dangling bond* yang baru tercipta. *Dangling bond* lalu ditinggalkan oleh atom H, kemudian berekombinasi dengan  $D^-$  membentuk ikatan normal Si-Si (Gambar 2.9 (b)) (Deng, 1991).



**Gambar 2.9** Model mikroskopis pemasifan konfigurasi dopan aktif  $P_4^+$  menjadi keadaan  $P_3^0$  yang netral (Deng, 1991).

## 2.6 Transpor Listrik a-Si:H Tipe-N

Suatu kuantitas yang dapat menunjukkan transport listrik di dalam bahan berkaitan dengan konduktivitas. Konduktivitas merupakan besaran makroskopik yang merupakan produk dari muatan elektronik, rapat pembawa muatan dan mobilitas pembawa (Scansen, 1996).

$$\sigma = en\mu \quad (2.15)$$

Pada semikonduktor ekstrinsik, elektron dan *hole* berkontribusi dalam menentukan konduktivitas (Sze, 2002).

$$\rho \equiv \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{q(n\mu_n + p\mu_p)} \quad (2.16)$$

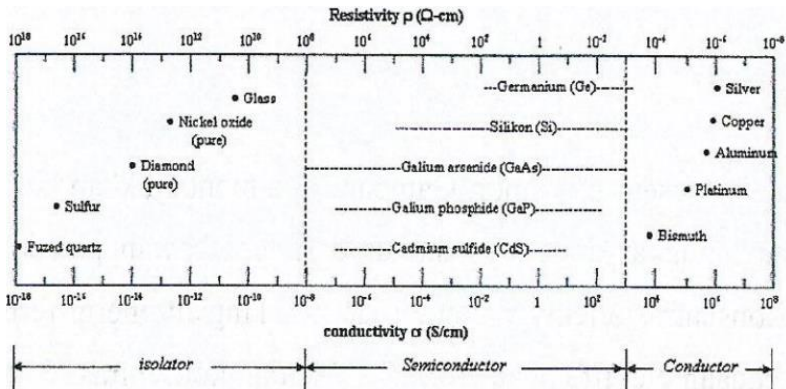
Namun, hanya salah satu kompone saja yang memiliki pengaruh yang signifikan dikarenakan perbedaan konsentrasi diantara keduanya hingga beberapa orde besarnya (Sze, 2002).

$$\rho \equiv \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{nq\mu_n} \quad (2.17)$$

Transpor elektronik sebagian besar terjadi pada tepi pita, namun keberadaan ekor pita juga memiliki pengaruh besar yang menentukan sifat transpor elektronik. Cacat koordinasi berupa *dangling bond* menghasilkan suatu rapat keadaan elektronik di sekitar tengah pita (*mid-gap*). Rapat keadaan terlokalisasi di tengah pita mempengaruhi sifat elektronik dengan mengontrol mekanisme *trapping* dan rekombinasi. Pada kasus silikon amorf tak terhidrogenasi, terdapat sejumlah besar rapat keadaan terlokalisasi di antara celah pitanya sehingga proses hantaran pada tingkat energi Fermi seperti hantaran lompat (*hopping conduction*). Lain halnya dengan a-Si:H, dengan rapat keadaan terlokalisasi yang relatif lebih rendah, maka proses hantaran lompat tersebut berkurang. Konduktivitas listrik dapat dituliskan menurut Persamaan 2.18 berikut (Nigavekar, 1990).

$$\sigma(T) = \sigma_0 \exp \left[ -\frac{(E_C - E_F)}{kT} \right] \quad (2.18)$$

Dimana  $E_F$  merupakan tingkat energi Fermi,  $\sigma_0$  adalah prefaktor,  $k$  adalah konstanta Boltzmann dan  $T$  adalah temperatur.



**Gambar 2.10** Rentang nilai konduktivitas isolator, semikonduktor dan konduktor (Sze, 2002).

Konduktivitas terang biasanya diperoleh penyinaran spektrum cahaya AM 1,5 atau sinar dengan intensitas  $100 \text{ mW/cm}^2$ . Jika diasumsikan bahwa arus yang mengalir dalam a-Si:H tipe-n didominasi oleh elektron, transpor dan rekombinasi yang dikarakterisasi dari mobilitas elektron dan *life-time* maka fotokonduktivitasnya dapat dituliskan sebagai (Poortmans, 2006).

$$\sigma_{ph} = q\mu\Delta n = q\mu\tau G \quad (2.19)$$

Dengan  $q$  adalah muatan elektron,  $\mu$  adalah mobilitas elektron,  $\tau$  adalah *life-time*,  $\Delta n$  adalah konsentrasi elektron yang terbangkitkan oleh sinar (*photogenerated electron*). Laju muatan pembawa yang terbangkitkan  $G$  bergantung pada koefisien absorpsi  $\alpha$  dan efisiensi kuantum  $\eta_g$ .

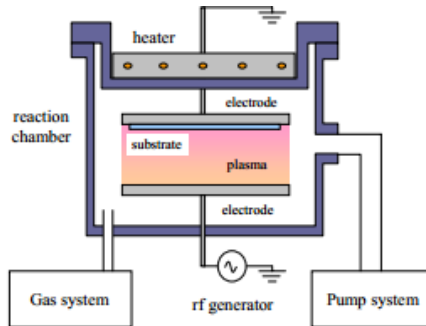
## 2.7 Deposisi Lapisan a-Si:H dengan PECVD

Salah satu metode deposisi yang banyak digunakan untuk menghasilkan lapisan a-Si:H adalah RF-PECVD dimana frekuensi eksitasi plasma 13,56 MHz. Plasma sering disebut juga gas yang bermuatan listrik (gas yang elektronnya terlepas). Dalam pembentukan plasma dibutuhkan energi untuk melepaskan elektron-elektron dari atom-atom netral. Sumber energi yang biasa dipakai yaitu energi panas, energi listrik dan energi cahaya yang berasal dari sinar ultraviolet atau laser. Plasma dapat dipandang sebagai fase ke empat (Marc, 2013).

Plasma berperan untuk memberikan sumber energi untuk mendisosiasi sumber gas silan ( $\text{SiH}_4$ ). Pertumbuhan lapisan a-Si:H dilakukan oleh partikel-partikel reaktif yang disebut sebagai radikal yang muncul dari molekul silan yang terdisosiasi selama proses deposisi. Salah satu keuntungan penting dari proses PECVD adalah temperatur gas yang rendah sehingga cocok digunakan untuk berbagai jenis substrat. Tumbukan inelastik yang mungkin antara elektron dan spesies gas (A) di dalam proses PECVD: (Yoyok, 2012).

- Eksitasi  $: A + e^- \rightarrow A^* + e^-$

- Ionisasi :  $A + e^- \rightarrow A^* + 2e^-$
- Disosiasi :  $A_2 + e^- \rightarrow 2A + e^-$
- *Electron attachment* :  $A + e^- \rightarrow A^-$
- *Dissociative attachment* :  $A_2 + e^- \rightarrow A + A^-$



**Gambar 2.11** Skema sistem PECVD (Marc, 2013).

Proses deposisi lapisan a-Si:H dari plasma gas silan dapat dijelaskan kedalam 4 tahap:

1. Reaksi primer dalam fase gas dimana molekul-molekul silan terdekomposisi oleh tumbukan elektron yang menghasilkan beragam radikal netral, ion positif dan negatif dan elektron.
2. Reaksi sekunder dalam plasma diantara molekul, ion dan radikal. Reaksi-reaksi yang terjadi di dalam zona deposisi dimana reaksi *cross-linking* menghasilkan formasi lapisan tipis. Spesies netral berdifusi ke dalam substrat, ion positif menembak lapisan dan ion negatif terperangkap dalam plasma.
3. Interaksi plasma dan permukaan selama proses penumbuhan lapisan tipis yang meliputi difusi radikal, ikatan kimia dan pengikatan hidrogen pada permukaan.
4. Sub permukaan melepaskan hidrogen dan terjadi relaksasi struktur jaringan silikon (Marc, 2013).

Pembuatan lapisan tipis silikon amorf dengan sistem PECVD dengan menggunakan gas silan ( $\text{SiH}_4$ ) dan hidrogen serta gas

dopan, dimana lapisan tipis tipe-n digunakan gas pospin ( $\text{PH}_3$ ) sebagai gas dopan yang dialirkan ke dalam campuran gas silan dan hidrogen. Perbandingan laju gas silan dan hidrogen disebut *dilution ratio*

$$R = \frac{H_2}{SiH_4} \quad (2.20)$$

rasio gas hidrogen dan silan memegang peranan penting dalam pembentukan lapisan tipis silikon selama proses deposisi. Dimana penambahan hidrogen dalam proses deposisi lapisan tipis silikon akan menggeser transmitansi ke arah panjang gelombang yang lebih pendek, sehingga energi yang dihasilkan akan bertambah besar, tetapi akan menurunkan laju proses deposisi. Rasio pencampuran gas silan dan hidrogen rendah ( $R < 10$ ) akan menghasilkan lapisan yang invarian amorf. Sedangkan untuk pencampuran rasio tinggi ( $R > 10$ ) akan terbentuk lapisan pada fase protokristal (Takahashi, 1986).

## **BAB III**

### **METODOLOGI PENELITIAN**

#### **3.1 Alat Dan Bahan**

##### **3.1.1 Alat**

Peralatan yang digunakan dalam penelitian tugas akhir ini adalah kaca ITO ukuran 10x10 cm<sup>2</sup>, sistem *Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition* (PECVD), multimeter, pemotong kaca, kertas label, tisu, plastik klip, perangkat *Atomic Force Microscopy* (AFM), perangkat metode empat titik (*Four Point Probe*), perangkat UV-Vis (*Ultraviolet-Visible*), dan perangkat *Fourier Transform Infrared* (FTIR).

##### **3.1.2 Bahan**

Bahan-bahan yang digunakan pada penelitian tugas akhir ini adalah gas Silan (SiH<sub>4</sub>), gas Fosfin (PH<sub>3</sub>), gas Hidrogen (H<sub>2</sub>), diwater, pasta karbon.

#### **3.2 Langkah Kerja**

##### **3.2.1 Preparasi Sampel**

Sampel dibuat di atas kaca ITO dengan ukuran 10x10 cm<sup>2</sup>. Dalam penelitian ini digunakan diwater untuk membersihkan sampel dan dikeringkan dengan tisu. Hal ini bertujuan untuk membersihkan sampel dari debu atau kotoran yang mungkin menempel pada permukaan substrat kaca ITO.

##### **3.2.2 Proses Deposisi**

Proses deposisi pembuatan struktur lapisan tunggal tipe-n dilakukan di atas substrat kaca ITO. Kaca ITO dipilih karena kaca ini memiliki lapisan konduktif pada salah satu permukaannya sehingga bisa dijadikan perbedaan permukaan kaca yang sudah tertutupi oleh lapisan tipis tunggal tipe-n dan yang tidak. Sebelum memulai proses deposisi, *chamber* ekstrinsik PL3 dipompa hingga mendekati vakum berkisar 10<sup>-7</sup> torr untuk membersihkan *chamber* dari partikel-partikel debu atau kontaminasi lainnya.

Struktur lapisan tipis tunggal silikon amorf terhidrogenasi (a-Si:H) tipe-n difabrikasi dengan sitem PECVD dengan daya RF ditetapkan pada nilai 5 watt, temperatur substrat 270°C, tekanan *chamber* 530 mTorr, laju gas silan (SiH<sub>4</sub>) 20 sccm, laju gas fosfin (PH<sub>3</sub>) 5 sccm dan waktu deposisi 15 menit. Parameter sistem PECVD yang dioptimasi dalam penelitian ini meliputi laju gas hidrogen (H<sub>2</sub>). Variasi menggunakan laju gas hidrogen dari 0-60 sccm. Perincian mengenai parameter yang digunakan pada proses deposisi penelitian ini dapat dilihat pada tabel berikut

**Tabel 3.1** Parameter deposisi lapisan a-Si:H tipe-n

No	Sampel	Laju Silan (sccm)	Laju Fosfin (sccm)	Laju Hidrogen (sccm)
1	A	20	5	0
2	B			20
3	C			40
4	D			60

### 3.3 Karakterisasi Sampel

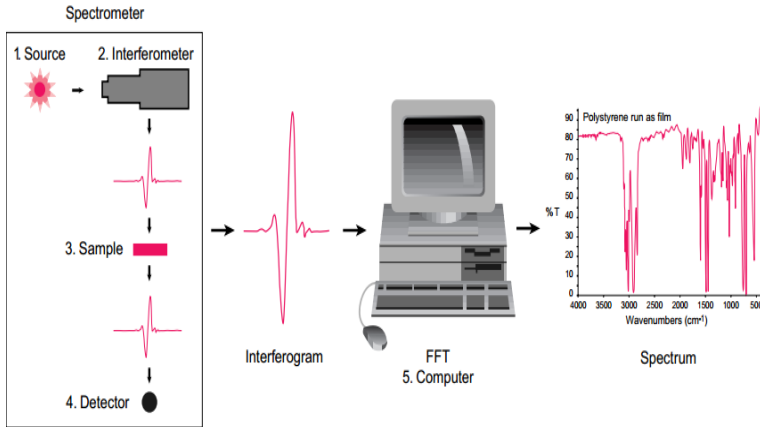
Lapisan tipis tunggal a-Si:H tipe-n yang telah dideposisi selanjutnya dilakukan karakterisasi untuk menentukan ikatan yang terbentuk, ketebalan lapisan, energi gap dan konduktivitas. Karakterisasi ini diperlukan sebagai data pendukung untuk lapisan a-Si:H tipe-n yang akan diaplikasikan sebagai bahan sel surya p-i-n.

#### 3.3.1 *Fourier Transform Infrared (FTIR)*

Spektroskopi *Fourier Transform Infrared* (FTIR) adalah alat untuk mengidentifikasi jenis ikatan kimia dalam molekul dengan menghasilkan penyerapan spektrum *infrared*. Panjang gelombang cahaya yang diserap adalah karakteristik dari ikatan kimia. Dengan menafsirkan penyerapan spektrum inframerah, ikatan kimia dalam molekul dapat ditentukan. Spektrum yang dihasilkan



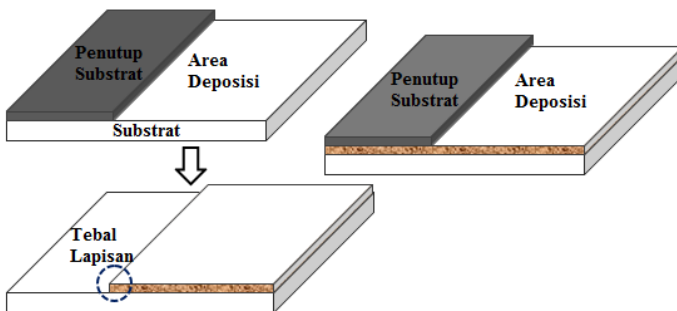
dapat diidentifikasi dengan membandingkan pada senyawa yang sudah dikenal. Skema kerja FTIR ditunjukkan pada Gambar 3.1.



**Gambar 3.1** Skema Kerja FTIR

### 3.3.2 Atomic Force Microscopy (AFM)

Morfologi permukaan dan tebal lapisan dikarakterisasi dengan menggunakan *Atomic Force Microscope* (AFM). Perangkat utama AFM adalah sebuah tip yang sangat tajam yang ditempatkan di ujung *cantilever*. *Cantilever* beserta tip digerakkan sepanjang permukaan lapisan yang diamati untuk memberikan informasi morfologi permukaan lapisan.



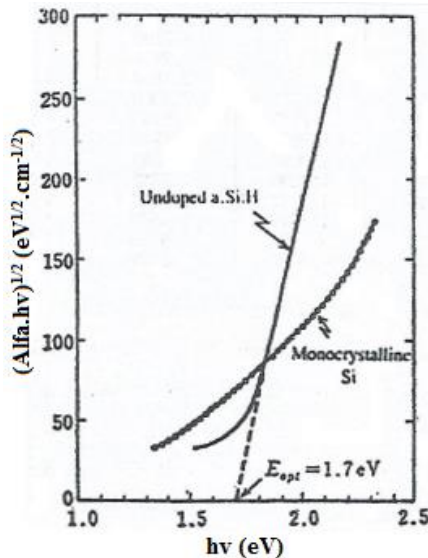
**Gambar 3.2** Metode penentuan tebal lapisan menggunakan AFM

### 3.3.3 Ultraviolet-Visible (UV-Vis)

Celah pita optik lapisan tipis tunggal a-Si:H tipe-n diperoleh dari data absorbansi spektrometer UV-Vis. Dalam penelitian ini panjang gelombang yang digunakan yaitu antara 200-800 nm. Karakterisasi celah optik dengan menggunakan spektrometer Uv-Vis dilakukan untuk mengetahui penyerapan (absorbansi) dan juga transmitansi dari sampel yang telah dibuat. Selain itu data yang didapatkan diolah dan digunakan untuk mencari energi gap dengan menggunakan metode Tauc's Plot. Celah pita optik diperoleh dari hubungan persamaan

$$\sqrt{\alpha h\nu} = B(h\nu - E_{opt}) \quad (3.1)$$

Metode yang digunakan untuk mencari energi gap dari lapisan tipis tunggal a-Si:H tipe-n yang telah dibuat ialah membuat plot hubungan  $(\alpha h\nu)^{1/2}$  vs  $h\nu$ .



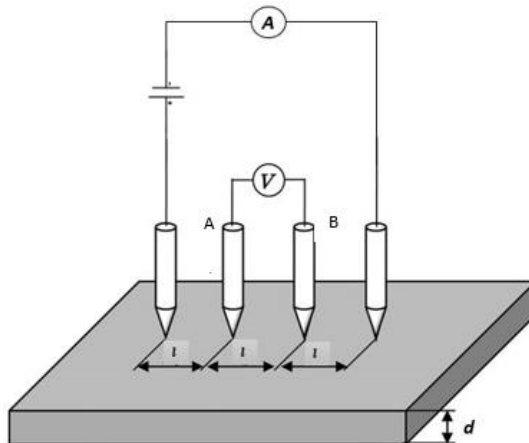
**Gambar 3.3** Metode penentuan energi gap optik ( $E_{optik}$ ) sampel silikon amorf dan silikon kristal (Takashi, 1986).

### 3.3.4 Metode Empat Titik (*Four Point Probe*)

Konduktivitas listrik lapisan tipis a-Si:H tipe-n dikarakterisasi menggunakan metode empat titik (*Four Point Probe*). Metode ini merupakan metode yang sesuai untuk pengukuran konduktivitas listrik lapisan tipis. Nilai konduktivitas listrik dihitung menggunakan persamaan

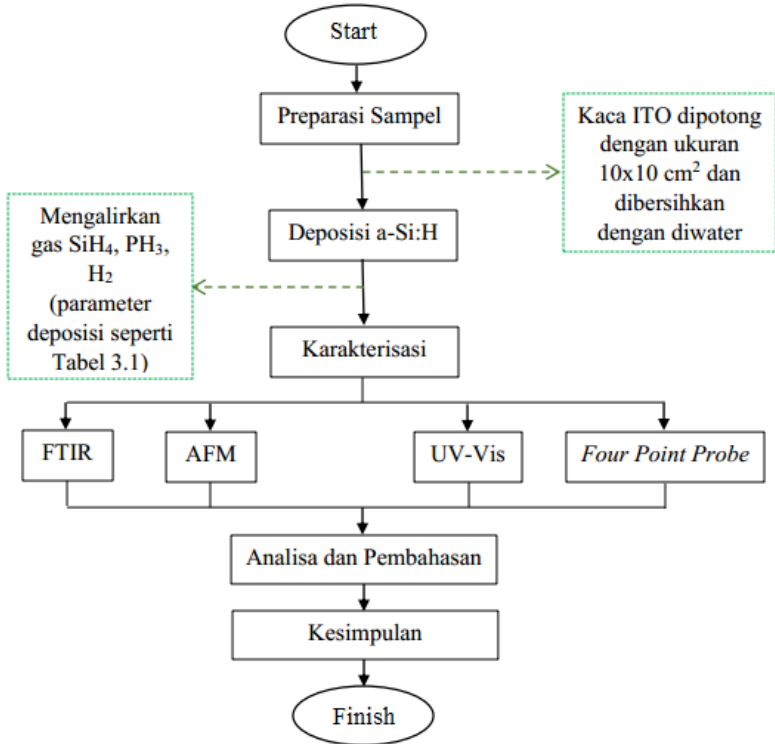
$$\sigma = \frac{l_{A-B} \times I}{A \times V_{A-B}} \quad (3.2)$$

Faktor geometris merupakan faktor yang perlu diperhatikan dalam pengukuran konduktivitas listrik menggunakan metode empat titik. Pengukuran yang akurat dapat dilakukan pada bagian tengah sampel setidaknya memiliki jarak dari tepi sebesar 20 kali jarak probe. Pada pengukuran ini luasan pengukuran dibuat persegi dengan ukuran  $1 \times 1 \text{ cm}^2$  sehingga jarak antar probe sebesar 0,25 cm dapat dilihat pada Gambar 3.4 berikut



**Gambar 3.4** Penempatan probe pada pengukuran metode empat titik untuk sampel persegi

### 3.4 Diagram Alir Penelitian



**Gambar 3.5** Diagram Alir Pembuatan Lapisan a-Si:H Tipe-N

## **BAB IV**

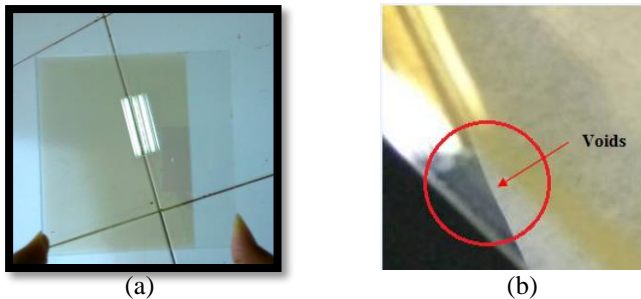
### **HASIL DAN PEMBAHASAN**

Penelitian ini diawali dengan menumbuhkan lapisan tipis a-Si:H tipe-n dengan sistem *Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition* (PECVD). Setelah pembuatan sampel selesai, lapisan tipis a-Si:H tipe-n tumbuh di atas substrat kaca ITO yang selanjutnya pada masing-masing sampel dikarakterisasi atau dicari sifat fisik yaitu ketebalan, sifat kimia yaitu gugus fungsi, sifat optik yaitu *bandgap* dan sifat elektronik yaitu konduktivitas listrik. Gugus fungsi dianalisis dengan *Fourier Transform Infrared* (FTIR). Pada pengukuran konduktivitas digunakan metode empat titik (*Four Point Probe*). Sebelum perhitungan konduktivitas, dilakukan pengukuran tebal lapisan. Tebal lapisan dikarakterisasi dengan cara sampel atau lapisan diletakkan pada sebuah *tip* yang dilewatkan pada daerah perbatasan (lapisan dan substrat) sehingga akan diketahui perbedaan pada daerah perbatasan tersebut dan dianalisis sebagai tebal. Alat yang digunakan adalah *Atomic Force Microscopy* (AFM). Hasil ketebalan yang didapat juga digunakan dalam perhitungan *bandgap*. Pengukuran *bandgap* digunakan spektrometer Uv-Vis.

#### **4.1 Deposisi Sampel a-Si:H Tipe-N**

Lapisan tipis a-Si:H tipe-n ditumbuhkan di atas substrat kaca ITO ukuran 10x10 cm<sup>2</sup> dalam sistem reaktor *Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition* (PECVD). Sistem PECVD terdiri atas dua ruang (*chamber*) deposisi, yaitu *chamber* PL4 untuk lapisan intrinsik dan *chamber* PL3 untuk lapisan ekstrinsik. Deposisi lapisan tipis a-Si:H tipe-n dilakukan pada *chamber* PL3. Sistem PECVD mempunyai beberapa bagian, yaitu ruang deposisi (*deposition chamber*), pompa mekanik (*mechanical pump*), *turbo pump*, pengukuran tekanan (*pressure control*), indikator kevakuman (*vacuum gases*), valve.

Deposisi lapisan tipis a-Si:H tipe-n menggunakan gas prekursor Silan ( $\text{SiH}_4$ ), gas Fosfin ( $\text{PH}_3$ ) dan Hidrogen ( $\text{H}_2$ ). Selama proses deposisi berlangsung, laju aliran gas Silan dan gas Fosfin dibuat konstan, sedangkan untuk laju aliran gas Hidrogen divariasi untuk mengetahui pengaruh laju Hidrogen terhadap lapisan yang terbentuk. Parameter lain yang digunakan dibuat tetap, yaitu temperatur substrat pada ruang deposisi  $270^\circ\text{C}$ , daya RF 5 Watt, tekanan 530 mTorr dan proses deposisi dilakukan selama 15 menit. Eksperimen deposisi a-Si:H dilakukan di Laboratorium Energi ITS. Eksperimen dilakukan beberapa kali dengan laju gas Silan 20 sccm, laju gas Fosfin 5 sccm dan Hidrogen berbeda dapat dilihat pada Tabel 3.1. Hasil deposisi didapatkan lapisan berwarna kekuningan yang melapisi salah satu sisi kaca substrat (Gambar 4.1).



**Gambar 4.1** Lapisan a-Si:H tipe-n hasil deposisi PECVD (a) Lapisan halus dan homogen, (b) pada tepi lapisan muncul titik-titik kosong (*voids*).

Gambar 4.1 memperlihatkan lapisan a-Si:H tipe-n hasil deposisi dengan sistem PECVD. Lapisan dengan penampang permukaan yang halus disebut dengan daerah pasif, dimana substrat ITO yang mempunyai lapisan konduktif sudah terlapisi oleh lapisan a-Si:H tipe-n sehingga sudah tidak konduktif lagi. Daerah ini disebut daerah pasif dikarenakan ikatan-ikatan yang terbentuk merupakan ikatan Si-Si atau Si-H yang stabil, sehingga menghasilkan lapisan rata dan halus seperti terlihat pada Gambar 4.1(a). Sedangkan cacat permukaan berupa *void* atau *rough*

merupakan daerah yang masih aktif, dimana pada substrat kaca ITO masih terdapat lapisan konduktif yang terlihat pada Gambar 4.1(b). Daerah yang masih aktif ini dikarenakan masih terdapat ikatan-ikatan Si yang kosong atau belum berikatan. Terbentuknya daerah yang masih aktif atau permukaan yang tidak homogen ini juga disebabkan sistem PECVD yang jarang dioperasikan. Hasil yang diharapkan dari eksperimen ini yaitu lapisan berwarna kekuningan yang transparan dan merata seperti Gambar 4.1(a). Lapisan tersebut dianggap homogen, sebagai indikasinya yaitu warna kuning transparan yang merata. Dalam menghasilkan lapisan yang rata dan homogen, maka sistem PECVD juga harus dioperasikan secara rutin sehingga dapat menghasilkan lapisan seperti pada Gambar 4.1(a).

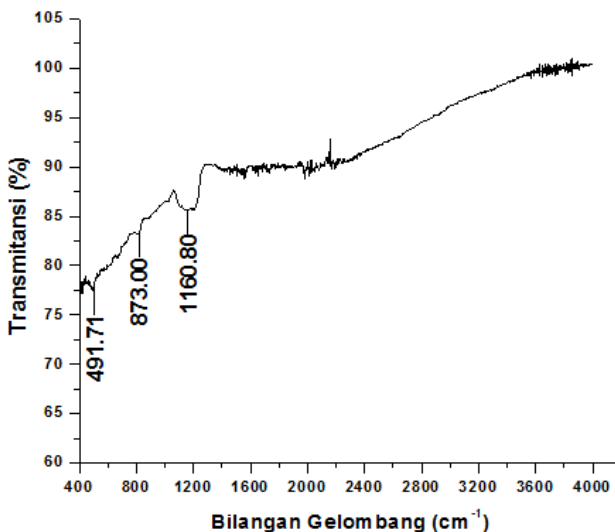
Hasil deposisi lapisan a-Si:H dari eksperimen seperti Gambar 4.1 dapat dijelaskan melalui tahap-tahap deposisi yang telah diuraikan pada Bab II. Terbentuknya ruang kosong (*voids*) pada permukaan dijelaskan bahwa setelah *cluster* Si-H berdifusi kemudian terjadi *cross-link* sehingga molekul H<sub>2</sub> terjebak di dalam lapisan. Selanjutnya tegangan dan regangan yang besar menghasilkan ikatan yang lemah pada permukaan sangat mudah terputus (*break down*) dengan adanya energi aktivasi. Terputusnya ikatan antar Si akan terjadi terlepasnya atom H ke udara bebas. Kejadian seperti ini juga tampak pada hasil deposisi pada jenis yang kedua.

## 4.2 Analisis Ikatan Molekuler Lapisan a-Si:H Tipe-N

Terbentuknya warna plasma selama proses deposisi menunjukkan adanya reaksi kimia atau munculnya ikatan. Ikatan antar permukaan itu sendiri terjadi karena interaksi antara adhesi dan kohesi dari pergerakan molekuler pada material penyusunnya tersebut, begitu pula pada proses deposisi lapisan a-Si:H dengan menggunakan sistem PECVD. Pengidentifikasian jenis ikatan molekuler serta gugus fungsi yang terbentuk pada lapisan a-Si:H tipe-n tersebut maka dapat dilakukan pengujian dengan menggunakan *Fourier Transform Infrared* (FTIR). Pengujian

FTIR dapat menunjukkan serapan panjang gelombang yang terjadi berdasarkan ikatan molekuler pada setiap molekul dari lapisan hasil deposisi.

Terbentuknya gugus fungsi dari suatu material atau lapisan terjadi ketika sebuah sinar inframerah dilewatkan pada suatu material, kemudian beberapa frekuensi dari sinar inframerah tersebut akan diserap oleh material atau lapisan, sedangkan frekuensi lainnya akan diteruskan. Transisi yang terjadi pada FTIR ini berhubungan dengan perubahan vibrasi yang terjadi pada molekul material tersebut. Dalam melakukan vibrasi, atom-atom pada material tersebut akan menyerap frekuensi tertentu dari gelombang inframerah, dan adanya ikatan molekuler dapat diketahui melalui identifikasi frekuensi sebagai puncak absorbs dalam spektrum inframerah. Namun demikian tidak semua ikatan dapat menyerap energi radiasi yang sesuai. Hal ini dikarenakan hanya ikatan yang mempunyai momen dipol saja yang dapat menyerap radiasi inframerah. Berikut ini adalah hasil pengujian FTIR dari lapisan a-Si:H tipe-n.



**Gambar 4.2** Spektrum FTIR Lapisan a-Si:H Tipe-N



Gambar 4.2 memperlihatkan hasil pengujian FTIR dan didapatkan bilangan gelombang dari lapisan a-Si:H tipe-n yang terbentuk yang nantinya akan dibandingkan dengan bilangan gelombang referensi, sehingga akan didapatkan gugus fungsi dari lapisan a-Si:H tipe-n yang diujikan.

**Tabel 4.1** Data Spektroskopi FTIR Lapisan a-Si:H Tipe-N

No	Gugus Fungsi	Bilangan Gelombang (cm <sup>-1</sup> )*	Bilangan Gelombang (cm <sup>-1</sup> )
1	Deformasi Luar Bidang Si-O	494	491.71
2	SiH <sub>2</sub> Tekuk	880	873.00
3	Si=O Ulur	1110	1160.80

\*bilangan gelombang referensi (Jahja, 1997)

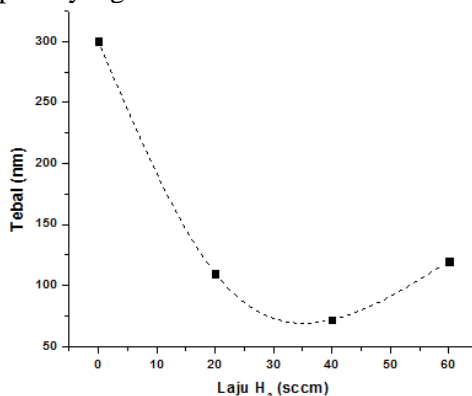
Tabel 4.1 memperlihatkan data hasil FTIR lapisan a-Si:H tipe-n, diketahui bahwa bilangan gelombang referensi dengan bilangan gelombang dari material uji hampir sama. Munculnya puncak di 491,71 cm<sup>-1</sup> diidentifikasi sebagai ikatan deformasi luar bidang Si-O, pada puncak 873,00 cm<sup>-1</sup> menandakan bahwa adanya penambahan Hidrogen mengakibatkan atom-atom H juga turut berperan dalam pembentukan lapisan a-Si:H tipe-n dan munculnya puncak pada 1160,80 cm<sup>-1</sup> yaitu ikatan Si=O ulur lapisan berasal dari interaksi lapisan dengan udara luar saat lapisan sudah dikeluarkan dari *chamber* sistem PECVD.

#### 4.3 Analisis Ketebalan Lapisan a-Si:H Tipe-N

Lapisan tipis a-Si:H tipe-n yang ditumbuhkan sebanyak empat sampel, dimana masing-masing sampel diberi indeks A sampai D sesuai dengan laju gas hidrogen. Salah satu karakteristik dari lapisan tipis yaitu ketebalan lapisan. Ketebalan lapisan tipis a-Si:H tipe-n diukur dengan alat uji *Atomic Force Microscopy* (AFM) yang akan mengkarakterisasi material dengan menggunakan gaya atom antar tip dan substrat. AFM yang terdiri

atas beberapa perangkat seperti *tip*, *cantilever*, sensor piezoelektrik dan *photodetector*. Selama proses karakterisasi material, *tip* akan bergerak sepanjang permukaan material uji sehingga menyebabkan kemiringan *cantilever* berubah-ubah. Kemiringan *cantilever* akan dideteksi oleh *photodetector*. Sinar laser yang diberikan ke *cantilever* akan diterima oleh *detector* yang akan dideteksi sebagai kemiringan *cantilever*. Pengukuran atau *scanning* diambil pada daerah perbatasan lapisan dan substrat (tidak ada lapisan). Perubahan kemiringan ini akan memberikan informasi kedalaman. *Scanning* pada daerah perbatasan ini akan didapatkan informasi perbedaan ketinggian atau kedalaman yang menyatakan ketebalan dari lapisan tipis yang terbentuk.

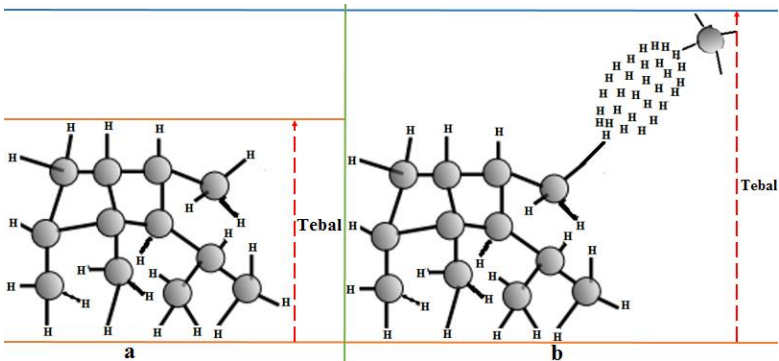
Berdasarkan pengujian AFM selanjutnya dianalisis ketebalan dengan mengambil rata-rata ketinggian pada masing-masing permukaan lapisan dan permukaan substrat, sehingga didapatkan ketebalan dari setiap lapisan a-Si:H tipe-n yang diujikan. Data hasil ketebalan selanjutnya dibuat grafik pada Gambar 4.3 yang tersusun dengan perbandingan laju gas Hidrogen terhadap ketebalan lapisan yang terbentuk.



**Gambar 4.3** Grafik pengaruh laju hidrogen terhadap ketebalan lapisan

Gambar 4.3 menunjukkan pengaruh laju gas hidrogen terhadap ketebalan lapisan. Dimana ketebalan lapisan menurun

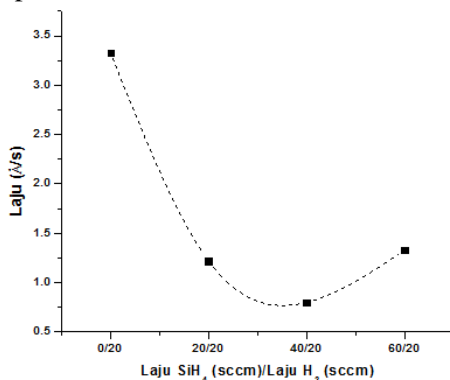
seiring dengan meningkatnya laju gas hidrogen. Sehingga dengan menurun atau melambatnya laju gas silan ( $\text{SiH}_4$ ) pada proses deposisi mengakibatkan pembentukan lapisan pada substrat juga semakin lambat sehingga lapisan yang terbentuk semakin tipis. Namun pada laju hidrogen yang paling tinggi (60 sccm) lapisan yang terbentuk justru semakin tebal.



**Gambar 4.4** Tebal lapisan akibat pengaruh laju  $\text{H}_2$  (a) 40 sccm, (b) 60 sccm

Gambar 4.4 menunjukkan pengaruh penambahan laju gas Hidrogen terhadap tebal lapisan yang terbentuk. Dimana ketebalan lapisan menurun seiring dengan peningkatan laju gas hidrogen. Penambahan gas hidrogen berperan dalam memperlambat laju aliran gas silan dalam proses pembentukan lapisan. Mekanisme perlambatan laju gas silan dapat terjadi dimana atom-atom H akan mengisi ikatan-ikatan Si yang kosong. Seiring dengan peningkatan gas hidrogen maka ikatan-ikatan Si yang kosong akan terisi oleh atom-atom H. Namun pada laju gas hidrogen yang semakin tinggi (60 sccm) lapisan yang terbentuk justru semakin tebal. Hal ini dikarenakan pada laju gas hidrogen 40 sccm diduga atom-atom H sudah berikatan dengan ikatan Si yang kosong, sehingga ikatan-ikatan Si sudah terpenuhi semua. Adanya kelebihan atom H dari laju gas hidrogen yang paling tinggi mengakibatkan atom-atom H akan berikatan dengan atom H lainnya yang membentuk jembatan Hidrogen seperti pada

Gambar 4.4 (b). Ikatan-ikatan atom H yang membentuk jembatan hidrogen ini mengakibatkan lapisan yang terbentuk semakin tebal. Nilai ketebalan pada Gambar 4.3 digunakan untuk perhitungan besar laju rata-rata proses deposisi lapisan tipis a-Si:H tipe-n. Laju deposisi rata-rata dari tebal sampel dibagi waktu lama deposisi.



**Gambar 4.5** Grafik laju deposisi

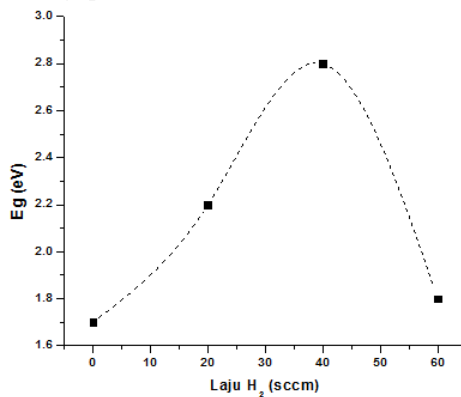
Laju deposisi pembuatan lapisan a-Si:H tipe-n sebagai fungsi laju hidrogen pada temperatur substrat  $270^\circ\text{C}$  ditunjukkan pada Gambar 4.5. Grafik tersebut menunjukkan laju deposisi menurun dengan perubahan laju hidrogen dari 0 sccm sampai 40 sccm tetapi terjadi peningkatan pada laju 60 sccm. Penurunan laju deposisi dipengaruhi oleh keadaan plasma, dimana plasma yang kaya akan ion H memungkinkan terjadi pelepasan H dari permukaan lapisan. Hal sebaliknya terjadi pada laju hidrogen 60 sccm yang mana terjadi peningkatan laju deposisi yang disebabkan oleh meningkatnya rapat elektron di dalam plasma sehingga rapat radikal di dekat substrat juga bertambah.

#### 4.4 Analisis Lebar Celah Pita Optik (*Bandgap*)

Salah satu sifat optik dari lapisan tipis yaitu lebar celah pita energi (*bandgap*). *Bandgap* sangat menentukan sifat-sifat dari semikonduktor diantaranya mobilitas pembawa muatan,

kerapatan pembawa muatan dan spektrum absorpsi. Dalam menentukan lebar celah pita energi, maka sampel lapisan tipis disinari dengan gelombang elektromagnetik (foton dengan energi tertentu) sehingga elektron menyerap energi foton tersebut. Besar energi foton ini harus cukup untuk bisa membuat elektron meloncat (berpindah) menuju tingkat energi yang lebih tinggi yaitu elektron berpindah dari pita valensi ke pita konduksi.

Pengukuran *bandgap* dilakukan dengan menggunakan spektrometer UV-Vis dengan energi foton yang berbeda mulai dari panjang gelombang 200 nm hingga 800 nm sehingga dapat diketahui absorbansi maupun transmitansi dari sampel lapisan tipis tersebut. Data panjang gelombang terhadap transmitansi tersebut selanjutnya digunakan dalam penentuan *bandgap* dengan menggunakan metode *Tauc's Plot* yaitu dengan membuat kurva  $h\nu$  terhadap  $(\alpha h\nu)^{1/2}$ , dimana  $h\nu$  menyatakan energi foton dan  $\alpha$  sebagai koefisien absorpsi. Dengan menarik garis linier kelengkungan dari energi tinggi ke energi rendah, maka didapatkan perpotongan terhadap sumbu mendatar dan diambil sebagai nilai *bandgap*.



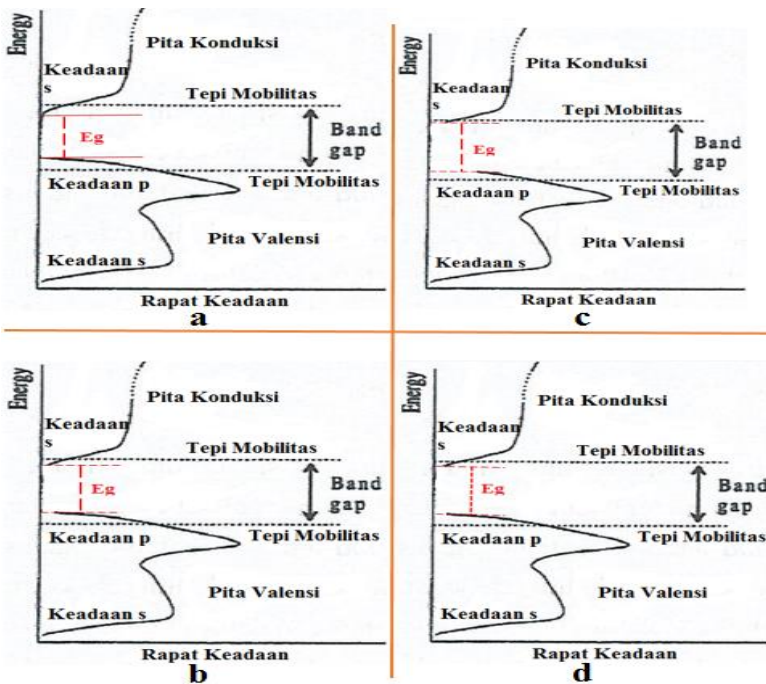
**Gambar 4.6** Grafik pengaruh laju hidrogen terhadap energi gap.

Gambar 4.6 menjelaskan hubungan pengaruh laju gas Hidrogen ( $H_2$ ) terhadap besar celah pita energi. *Bandgap* lapisan tipis a-Si:H tipe-n untuk setiap variasi laju gas hidrogen memperlihatkan peningkatan *bandgap* dengan peningkatan laju gas hidrogen. Pada Gambar 2.5 memperlihatkan model diagram orbital untuk silikon amorf dan juga distribusi rapat keadaan terhadap fungsi energi, dimana orbital s dan p akan bergabung menjadi orbital hibridisasi  $sp^3$ . Orbital  $sp^3$  tersebut terpisah karena interaksi-interaksi dalam ikatan sehingga menghasilkan pita valensi yang ditempati oleh atom-atom Si yang berikatan (*bonding*) dan pita konduksi yang ditempati oleh anti-ikatan atom-atom Si (*anti-bonding*). Sedangkan orbital silikon yang tidak terlibat dalam ikatan atau atom-atom Si yang belum berikatan dengan atom lain akan tetap berada di celah pita terlarang sebagai *defect*. Atom-atom Si yang belum berikatan ini sering disebut dengan *dangling bond*.

Pada pita valensi terbentuk orbital molekul *bonding* yang dibentuk dari atom-atom Si yang berikatan dengan atom-atom lain seperti berikatan dengan sesama atom Si (Si-Si) maupun ikatan atom Si dengan atom H dari penambahan gas hidrogen yang diberikan pada proses deposisi (Si-H). Pada orbital molekul *bonding* ikatan yang terbentuk lebih stabil. Maka seiring dengan penambahan gas hidrogen pada proses deposisi, atom-atom Si yang akan berikatan dengan atom H juga akan semakin banyak disamping juga berikatan dengan sesama atom Si.

Gambar 4.6 menunjukkan pengaruh penambahan laju gas Hidrogen terhadap lebar celah pita energi pada lapisan a-Si:H tipe-n. Dimana lebar celah pita energi semakin besar seiring dengan peningkatan laju gas hidrogen. Penambahan laju gas hidrogen berperan dalam mengurangi cacat pada celah pita terlarang pada bahan silikon amorf. Mekanisme pengurangan cacat dapat terjadi dimana atom-atom H akan mempasifkan ikatan-ikatan Si yang kosong. Seiring dengan penambahan laju gas hidrogen maka ikatan-ikatan Si yang kosong akan terisi oleh atom-atom H, sehingga cacat pada celah pita energi akan

berkurang yang mengakibatkan bergesernya pita valensi ke bawah dan pita valensi ke atas. Hal ini akan berakibat pada semakin lebarnya celah pita energi sehingga energi gap akan semakin besar, seperti terlihat pada Gambar 4.6 (a) sampai Gambar 4.6 (c). Namun pada pada laju gas hidrogen yang semakin tinggi (60 sccm) diduga ikatan-ikatan kosong Si sudah terisi penuh oleh atom-atom H pada laju gas hidrogen 40 sccm. Adanya kelebihan atom-atom H dari laju gas hidrogen yang paling tinggi mengakibatkan terbentuknya kembali cacat pada celah pita energi sehingga menggeser pita valensi ke atas dan pita konduksi ke bawah. Hal ini berakibat pada menyempitnya celah pita energi sehingga besar *bandgap* menurun seperti diperlihatkan pada Gambar 4.6 (d).



**Gambar 4.7** Pergeseran *bandgap* akibat pengaruh penambahan gas  $H_2$  (a) 0 sccm (b) 20 sccm (c) 40 sccm (d) 60 sccm.

#### 4.5 Analisis Konduktivitas Listrik Lapisan a-Si:H Tipe-N

Sifat listrik dari lapisan a-Si:H tipe-n dapat dikarakterisasi dari konduktivitas listriknya. Uji konduktivitas listrik pada lapisan tipis ada dua macam, yaitu konduktivitas listrik gelap dan konduktivitas listrik terang. Konduktivitas listrik terang merupakan konduktivitas listrik yang diukur saat lapisan disinari oleh cahaya, baik cahaya lampu maupun cahaya matahari secara langsung. Konduktivitas terang seharusnya diukur langsung dibawah sinar matahari pada kondisi AM 1,5. Sedangkan untuk konduktivitas listrik gelap merupakan konduktivitas listrik yang diukur pada keadaan gelap tanpa ada cahaya. Pada penelitian ini, uji konduktivitas listrik dilakukan di ruangan yang terang (terdapat cahaya lampu).

Nilai konduktivitas listrik dihitung dengan menggunakan Persamaan 3.2. Persamaan tersebut memperlihatkan bahwa besar konduktivitas listrik bergantung pada beberapa variabel, yaitu arus listrik, tegangan dan tebal lapisan. Tegangan yang dimaksud disini yaitu tegangan yang terukur pada dua *probe* yang terdalam yang terukur saat dialirkan arus listrik ( $I$ ) pada kedua *probe* yang terluar. Sedangkan untuk tebal lapisan, diambil dari pengukuran dengan menggunakan AFM yang diperlihatkan pada Gambar 4.3.

Pada pengukuran konduktivitas listrik dengan menggunakan metode empat titik ini sampel yang akan diuji dipotong dengan ukuran  $1 \times 1 \text{ cm}^2$ . Luas sampel dibuat sekecil mungkin dengan tujuan untuk mengurangi faktor koreksi dari pengukuran yang dilakukan. Selain ukuran sampel yang dibuat sekecil mungkin, bentuk sampel juga akan mempengaruhi faktor koreksi pengukuran. Apabila bentuk sampel dibuat lingkaran maka faktor koreksi pengukuran juga harus diperhatikan. Maka pada pengukuran konduktivitas listrik dengan menggunakan metode empat titik ini, bentuk luasan sampel dibuat persegi dengan



ukuran  $1 \times 1 \text{ cm}^2$  dan bukan bentuk lingkaran. Ukuran sampel sebesar  $1 \times 1 \text{ cm}^2$  maka jarak antar *probe* sebesar 0,25 cm. Sehingga dengan menggunakan metode pengukuran empat titik (*four point probe*) didapatkan nilai tegangan dan arus listrik sehingga dapat dihitung besar konduktivitas seperti yang tercantum pada Tabel 4.2.

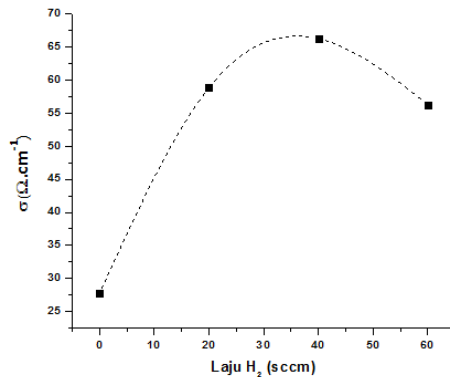
**Tabel 4.2** Hasil pengukuran konduktivitas listrik

No	Sampel	Tegangan $V_{a-b} \text{ (V)}$	Arus $I \text{ (mA)}$	Konduktivitas $\sigma \text{ (} \times 10^3 \text{ S/cm)}$
1	A	0,342	114	2,778
2	B	0,341	99,4	5,883
3	C	0,602	102	6,621
4	D	0,315	85,2	5,628

Tabel 4.2 memperlihatkan hasil pengujian konduktivitas listrik dengan menggunakan metode empat titik dan didapatkan besar konduktivitas listrik dari lapisan a-Si:H tipe-n sebagai pengaruh laju gas hidrogen ( $\text{H}_2$ ). Berdasarkan besar konduktivitas listrik yang tercantum pada Tabel 4.2 selanjutnya dibuat grafik pada Gambar 4.8 yang tersusun dengan perbandingan laju gas hidrogen terhadap konduktivitas listrik lapisan.

Gambar 4.8 menjelaskan hubungan pengaruh laju gas Hidrogen ( $\text{H}_2$ ) terhadap besar konduktivitas listrik lapisan a-Si:H tipe-n. Konduktivitas listrik lapisan tipis a-Si:H tipe-n untuk setiap variasi laju gas Hidrogen memperlihatkan peningkatan konduktivitas listrik seiring dengan peningkatan laju gas Hidrogen. Pada gambar 2.5 memperlihatkan model diagram orbital untuk silikon amorf dan juga distribusi rapat keadaan terhadap fungsi energi, dimana dimana orbital s dan p akan bergabung menjadi orbital hibridisasi  $\text{sp}^3$ . Orbital  $\text{sp}^3$  tersebut terpisah karena interaksi-interaksi dalam ikatan sehingga menghasilkan pita valensi yang ditempati oleh atom-atom Si

yang berikatan (*bonding*) dan pita konduksi yang ditempati oleh anti-ikatan atom-atom Si (*anti-bonding*). Sedangkan orbital silikon yang tidak terlibat dalam ikatan atau atom-atom Si yang belum berikatan dengan atom lain akan tetap berada di celah pita terlarang sebagai *defect*. Atom-atom Si yang belum berikatan ini sering disebut dengan *dangling bond*. Pada pita valensi terbentuk orbital molekul *bonding* yang dibentuk dari atom-atom Si yang berikatan dengan atom-atom lain seperti berikatan dengan sesama atom Si (Si-Si) maupun ikatan atom Si dengan atom H dari penambahan gas hidrogen yang diberikan pada proses deposisi (Si-H).

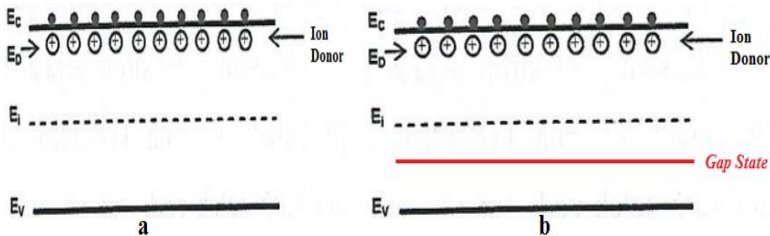


**Gambar 4.8** Grafik pengaruh laju hidrogen terhadap konduktivitas listrik

Gambar 4.8 menjelaskan bahwa seiring dengan penambahan gas hidrogen pada proses deposisi, atom-atom Si yang akan berikatan dengan atom H juga akan semakin banyak disamping juga berikatan dengan sesama atom Si. Semakin banyaknya atom Si yang berikatan maka tangan-tangan Si yang kosong akan semakin berkurang, dengan kata lain *dangling bond* yang menyebabkan adanya cacat pada celah pita terlarang juga semakin berkurang. Berkurangnya cacat pada celah pita terlarang akan memudahkan elektron-elektron pada pita valensi untuk

meloncat atau berpindah ke pita konduksi sehingga konduktivitas listrik akan semakin besar seiring dengan penambahan laju gas Hidrogen, seperti yang terlihat pada Gambar 4.9(a).

Namun pada laju gas hidrogen 60 sccm, konduktivitas listrik dari lapisan a-Si:H tipe-n justru mengalami penurunan. Jumlah atom H yang semakin banyak mengakibatkan terbentuknya kembali cacat pada celah pita terlarang namun bukan sebagai *dangling bond* tetapi berupa cacat yang lain. Jumlah atom H yang terlampaui banyak ini mengakibatkan terbentuknya *gap state* pada celah pita energi. Adanya *gap state* pada celah pita energi akan menghambat elektron untuk meloncat dari pita valensi ke pita konduksi. Elektron yang seharusnya dapat berpindah dari pita valensi harus melewati *gap state* terlebih dahulu kemudian meloncat ke pita konduksi, seperti yang terlihat pada Gambar 4.9(b). Hal ini mengakibatkan jumlah pembawa muatan berkurang dan konduktivitas listrik juga mengalami penurunan.



**Gambar 4.9** Ilustrasi tingkat energi a-Si:H tipe-n sebagai akibat pengaruh laju  $H_2$  (a) 40 sccm (d) 60 sccm.

Penurunan nilai konduktivitas listrik juga dapat dijelaskan melalui model pemasifan konfigurasi dopan seperti pada Gambar 2.7. Hidrogen berperan sebagai penurun keadaan cacat di celah energi terlarang dengan cara mempasifkan *dangling bond* sehingga membawa pendopongan yang efektif. Namun pada laju hidrogen sebesar 60 sccm menunjukkan hasil yang berbeda, dimana nilai konduktivitas listrik lapisan justru menurun. Selain

menurunkan keadaan cacat, hidrogen yang masuk secara interstisi dalam ikatan tetrahedral juga dapat pula mempasifkan konfigurasi dopan aktif yaitu Fosfin. Sehingga hidrogen dapat membatasi atom-atom yang muncul dalam konfigurasi dopan aktif ( $P_4^+$ ).

Gambar 2.9 menjelaskan sebuah atom fosfor dengan ikatan rangkap empat ( $P_4^+$ ) dan sebuah *dangling bond* ( $D^\cdot$ ) seperti pada gambar 2.9 (a), ikatan Si-P putus dan atom P berubah menjadi keadaan  $P_3^\cdot$ . keadaan atom H dapat berdifusi menjadi *dangling bond* yang baru tercipta. *Dangling bond* lalu ditinggalkan oleh atom H, kemudian berekombinasi dengan  $D^\cdot$  membentuk ikatan normal Si-Si. Penurunan konduktivitas yang teramati diduga disebabkan oleh mekanisme pemasifan dopan aktif oleh hidrogen seperti yang telah dijelaskan di atas dan diperoleh bahwa penggunaan laju hidrogen yang tinggi membuat pendopongan menjadi tidak efektif sehingga menurunkan nilai konduktivitas listrik dari lapisan a-Si:H tipe-n.

## **BAB V**

### **KESIMPULAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Ikatan molekuler yang terbentuk pada lapisan a-Si:H tipe-n yang telah dideposisi dengan parameter yang telah ditentukan yaitu pada puncak  $491,71 \text{ cm}^{-1}$  ikatan Deformasi Keluar Bidang Si-O, puncak  $873,00 \text{ cm}^{-1}$  ikatan SiH<sub>2</sub> Tekuk dan puncak  $1160,80 \text{ cm}^{-1}$  ikatan Si=O Ulur.
2. Tebal lapisan a-Si:H tipe-n menurun seiring dengan meningkatnya laju gas H<sub>2</sub> dalam rentang 0-40 sccm.
3. Lebar celah pita energi lapisan a-Si:H tipe-n semakin besar seiring dengan meningkatnya laju gas H<sub>2</sub> dalam rentang 0-40 sccm.
4. Konduktivitas listrik lapisan a-Si:H tipe-n semakin besar seiring dengan meningkatnya laju gas H<sub>2</sub> dalam rentang 0-40 sccm.

#### **5.2 Saran**

Berdasarkan hasil penelitian tugas akhir ini terdapat beberapa saran untuk penelitian lebih lanjut yaitu perlu dilakukan pengukuran ketebalan, celah pita energi (*bandgap*) dan konduktivitas listrik dengan alat pengukuran yang lain sehingga bisa digunakan untuk perbandingan untuk kesesuaian hasil yang didapat dengan alat pengukuran satu dengan yang lainnya.

***“Halaman ini sengaja dikosongkan”***

## DAFTAR PUSTAKA

- Cabarrocas, P. R. 1997. *Growth of undoped a-Si:H by PECVD*. in: "Properties of amorphous silicon and its alloys", edited by T. Searle.
- Cahyono, Yoyok, dkk. 2013. Studi Perubahan Struktur Lapisan Tipis Silikon Amorf Terhidrogenasi (a-Si:H) yang ditumbuhkan dengan metode PECVD melalui variasi *hydrogen dilution*, Penelitian Program Doktor, Dana BOPTN ITS.
- Chen, Yang-Fang. 1993. *Role of Interstitial in Hydrogenated Amorphous Silicon: A New Perspective*. Chinese Journal of Physics. Vol. 31. No. 3.
- Deng, Xun-Min. 1991. *Irreversible Changes in Doping Efficiency and Hydrogen Bonding in the Equilibrium State of a-Si:H*. Physical Review B. Vol. 43 No. 6.
- Evin Yudhi, Setyono, Eddy Yahya. 2009. *Sifat Elektronik Lapisan Tipis Silikon Amorf Terhidrogenasi (a-Si:H) Tipe-n Dideposisi dengan PECVD*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Frank, Dimroth and Sarah Kurtz. March 2007. *High Efficiency Multijunction Solar Cells*, MRS BULLETIN. Vol. 32.
- Fritzsche, H. 1998. *Amorphous Silicon and Related Materials*. World Scientific.
- Huang, Jung Y. et al. 2012. *Low cost high-efficiency amorphous silicon solar cells with improved light-soaking stability*, Solar Energy Materials & Solar Cells 98, 277–28.
- Jahja, M. 1997. *Pengaruh Perlakuan Anil pada Konstanta Absorpsi Optis dan Ikatan Lokal Lapisan Tipis Amorf Silikon Karbon*. Prosiding Pertemuan Ilmiah Sains Materi.
- Marc, Schouten. 2013. *The nanostructure of hydrogenated amorphous silicon, examined by means of thermal annealing and light soaking*, Master of Science Thesis, Faculty of Electrical Engineering, Mathematics and Computer Science, Delft University of Technology.

- Nigavekar, A.S., G. Srinivasan. 1990. *Role of Dopant in the Electronic Structure of Hydrogenated Amorphous Silicon*. Journal of Material Science and Engineering. Elsevier. Vol. B8 No. 23-37.
- Poortmans, Jef., Vladimir Arkhipov. 2006. *Thin Film Solar Cells Fabrication, Characterization and Applications*. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, England, p. 177.
- Scansen, D. W. 1996. *Excess Noise in N-Type Hydrogenated Amorphous Silicon*. Thesis Ph.D. University Saskatchewan.
- Shockley, W., H.J. Queisser. 1996. Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells, Journal of Applied Physics. Vol.32, No.3, p.510-519.
- Smets, A.H.M, E.A.G. Hamers, C. Smit, J.P.M. Hoefnagels, W.M.M. Kessels, and M.C.M. van de Sanden, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 2001. *Material properties and growth process of microcrystalline silicon with growth rate in excess of 1 nm/s*. Vol. 664, 4.2.1.
- Solomon, Nwabueze Agbo. 2012. *Growth and Characterization of Thin Film Nanocrystalline Silicon Materials and Solar Cells*, Dissertation, Solar energy Physics, University of Nigeria, Nsukka, Nigeria, p.23.
- Street, R. A. 1991. *Hydrogenated Amorphous Silicon*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Street, R. A. 2000. *Amorphous Semiconductor: Doping*. Elsevier.
- Sze, S.M. 2002. *Semiconductor Devices, Physics and Technology 2<sup>nd</sup> edition*. John Wiley & Sons.
- Takahashi, K., M. Konagai. 1986. *Amorphous Silicon Solar Cells*. translated by F.R.D. Apps., North Oxford Academic Publishers Ltd, London, p.3, 124.
- Yahya, E. 1984. *Density of Gap State in Hydrogen Amorphous Silicon*. Thesis Ph.D. Iowa State University.



# LAMPIRAN A

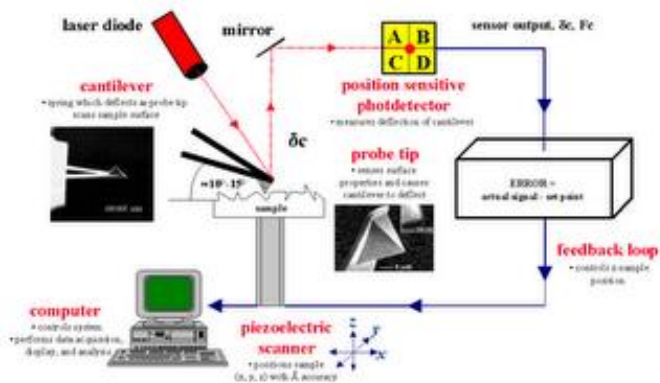
## Hasil Pengukuran Ketebalan dengan *Atomic Force Microscopy* (AFM)

### 1. Alat Uji *Atomic Force Microscopy* (AFM)

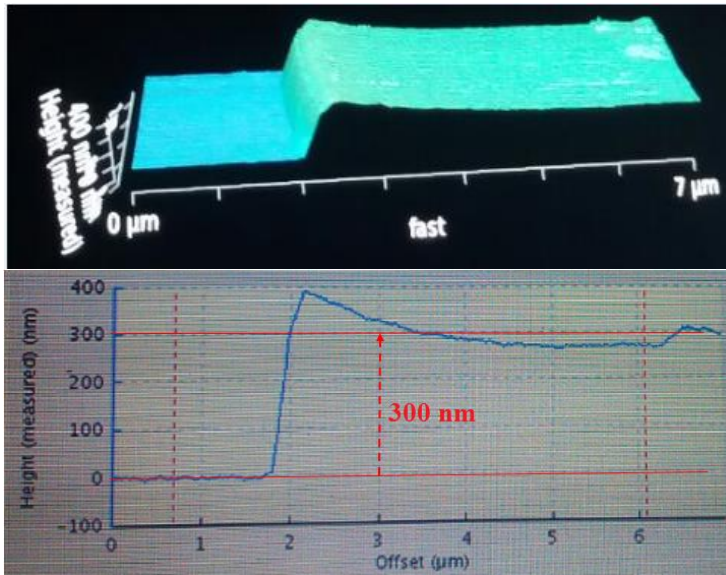


### 2. Skema Kerja AFM

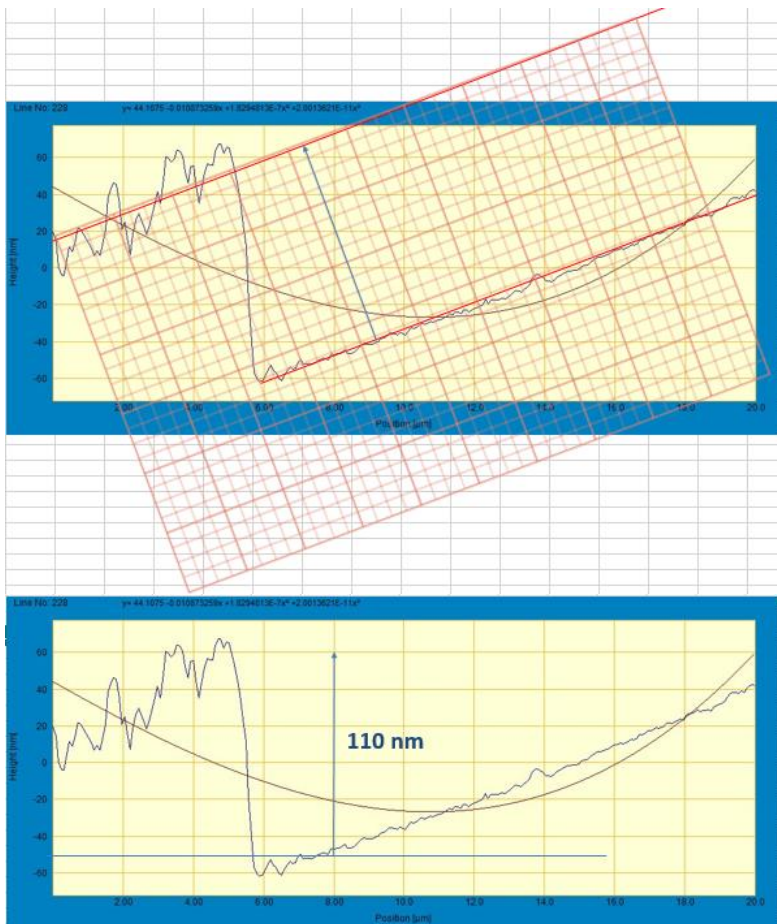
*Atomic Force Microscopy (AFM) :*  
General Components and Their Functions



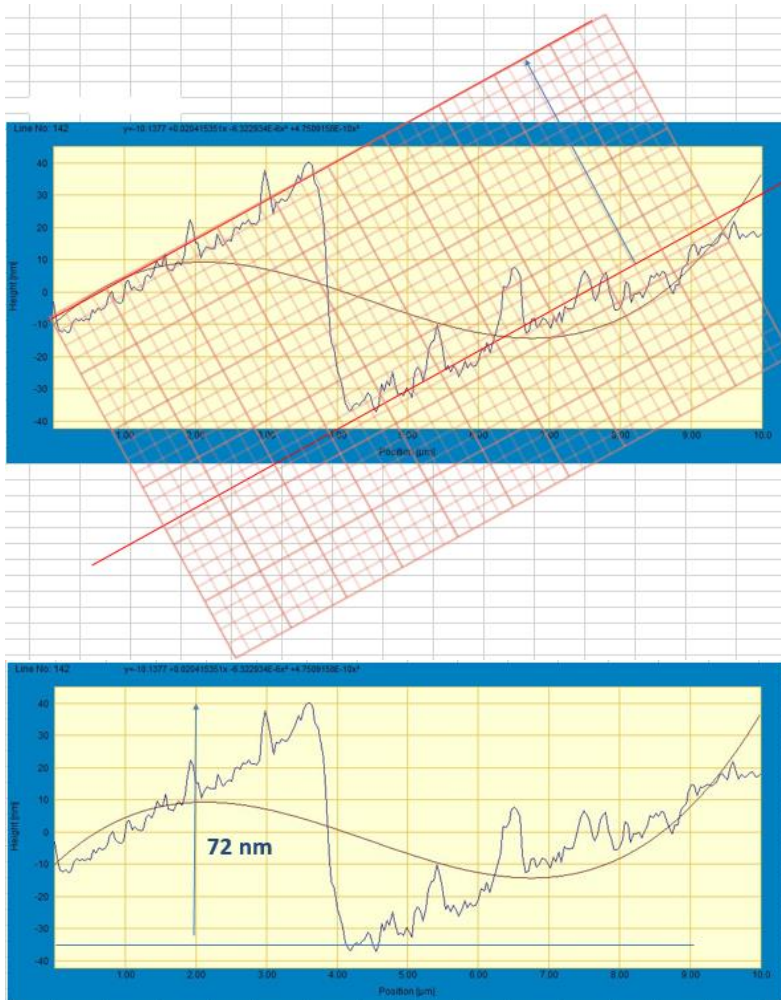
### 3. Analisis Ketebalan



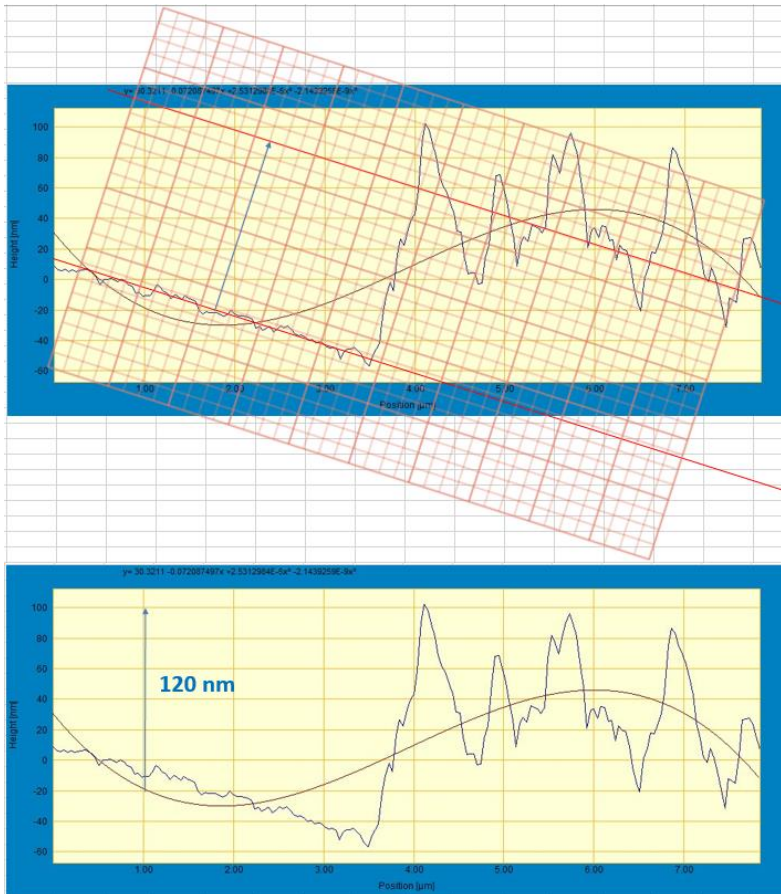
**Gambar 1** Hasil ketebalan Lapisan a-Si:H Tipe-N tanpa Hidrogen ( $H_2$ )



**Gambar 2** Hasil ketebalan Lapisan a-Si:H Tipe-N dengan laju  $H_2$  20 sccm



**Gambar 3** Hasil ketebalan Lapisan a-Si:H Tipe-N dengan laju  $H_2$  40 sccm



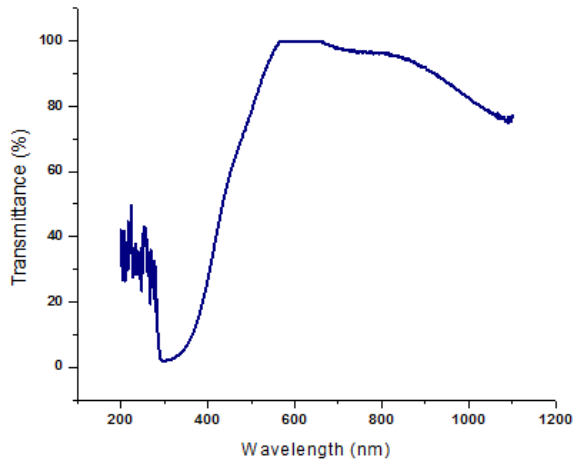
**Gambar 4** Hasil ketebalan Lapisan a-Si:H Tipe-N dengan laju  $H_2$  60 sccm

***“Halaman ini sengaja dikosongkan”***

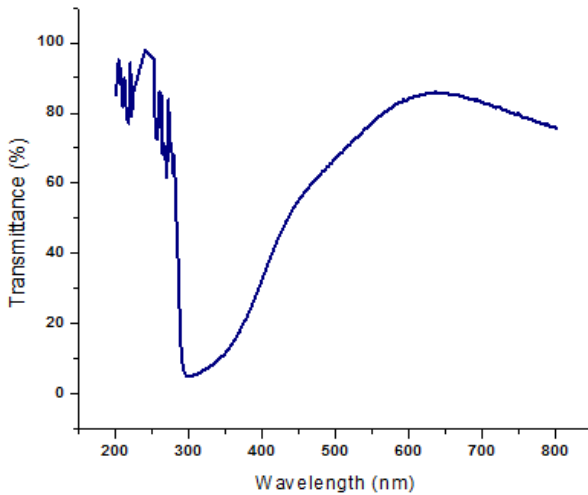
## LAMPIRAN B

### Hasil Pengukuran Spektrometer UV-Vis

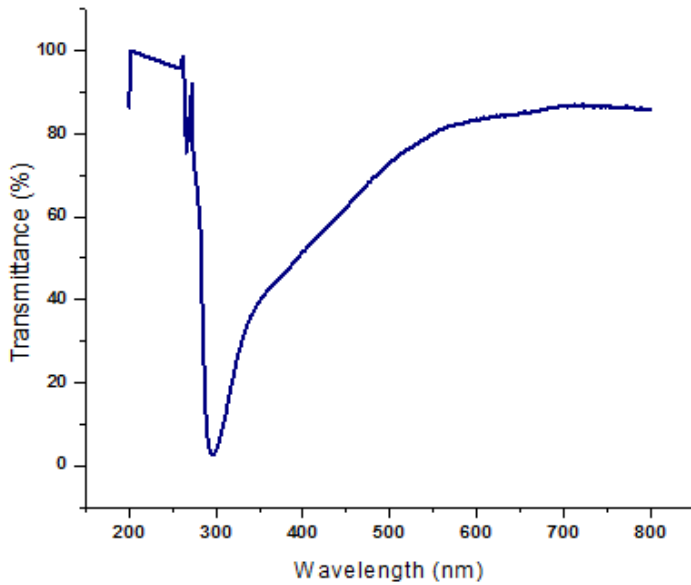
#### 1. Pengukuran Transmittansi Lapisan a-Si:H Tipe-N



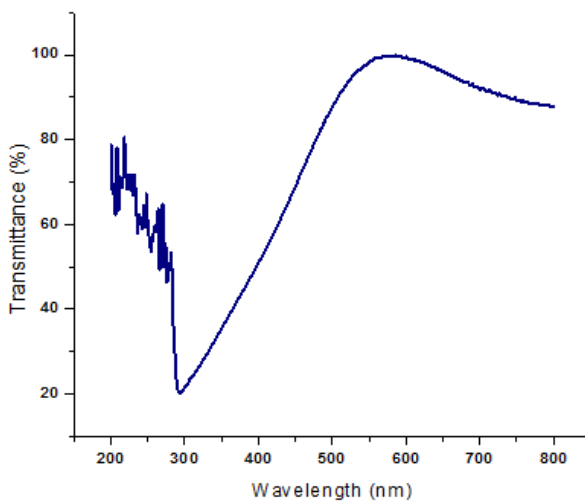
**Gambar 5** Grafik Transmittansi Lapisan a-Si:H Tipe-N tanpa Hidrogen



**Gambar 6** Grafik Transmittansi Lapisan a-Si:H Tipe-N laju H<sub>2</sub> 20 sccm



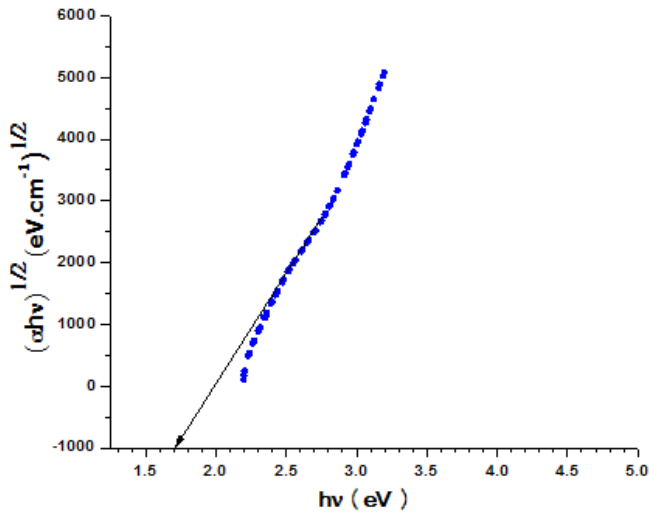
**Gambar 7** Grafik Transmittansi Lapisan a-Si:H Tipe-N laju  $H_2$  40 sccm



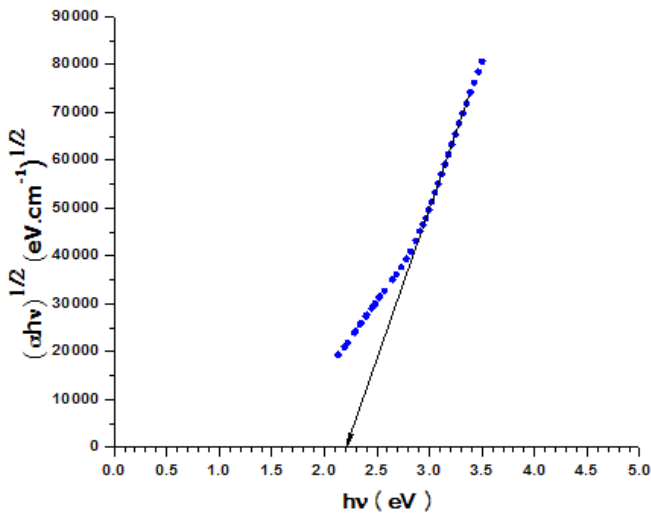
**Gambar 8** Grafik Transmittansi Lapisan a-Si:H Tipe-N laju  $H_2$  60 sccm



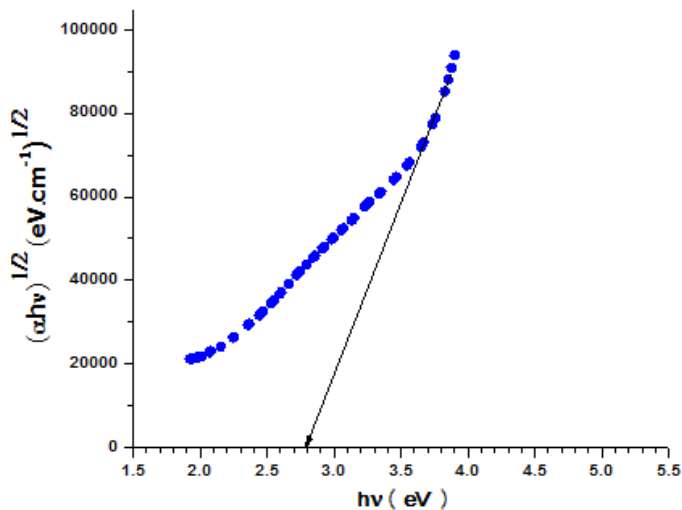
## 2. Analisis Energi Gap (*Bandgap*) Lapisan a-Si:H Tipe-N



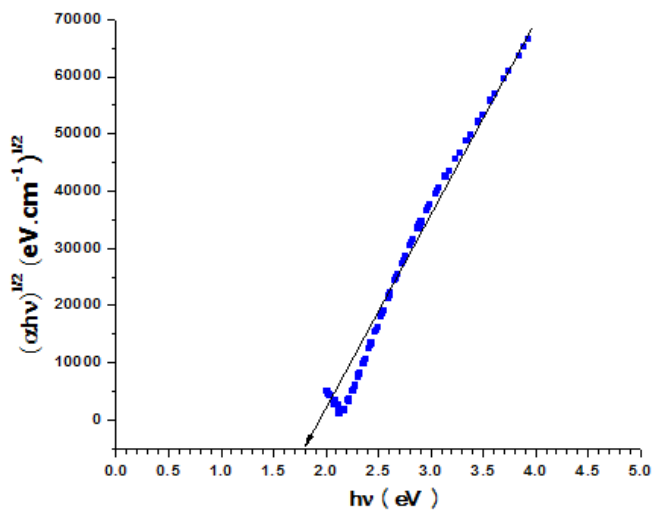
**Gambar 9** Grafik *Bandgap* Lapisan a-Si:H Tipe-N tanpa Hidrogen



**Gambar 10** Grafik Transmittansi Lapisan a-Si:H Tipe-N laju  $\text{H}_2$  20 sccm



**Gambar 11** Grafik Transmittansi Lapisan a-Si:H Tipe-N laju H<sub>2</sub> 40 sccm



**Gambar 12** Grafik Transmittansi Lapisan a-Si:H Tipe-N laju H<sub>2</sub> 60 sccm

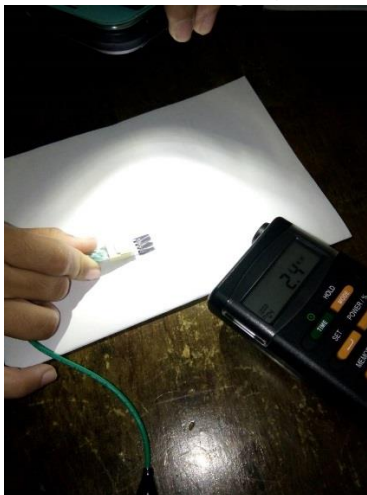
## **LAMPIRAN C**

### **Pengukuran Konduktivitas Listrik Lapisan a-Si:H Tipe-N**

#### **1. Rangkaian Metode Empat Titik (*Four Point Probe*)**



#### **2. Pengukuran Konduktivitas Terang**



***“Halaman ini sengaja dikosongkan”***

## BIODATA PENULIS



Penulis merupakan anak pertama dari dua bersaudara yang dilahirkan di Ponorogo pada 17 Maret 1995 dari pasangan Sabda Yuda Kusuma Ddewa dan Sunarti. Se-masa kecil penulis telah menempuh pendidikan formal di SDN 2 Ngasinan, SMPN 1 Jetis dan SMAN 1 Ponorogo serta pendidikan non formal di Taman Pendidikan Al-Qur'an (TPA) Roudlatus Darussalam Mantup. Pada pertengahan tahun 2013 penulis diterima di Jurusan Fisika FMIPA ITS melalui jalur SNMPTN dan terdaftar sebagai mahasiswa dengan NRP 1113100049. Selama perkuliahan, penulis aktif dalam berbagai kegiatan dan organisasi mahasiswa. Beberapa organisasi yang sempat ditekuni penulis yaitu sebagai staf Departemen Riset dan Teknologi HIMASIKA ITS (2014-2015), staf ahli *Research and Technology Department* HIMASIKA ITS (2015-2016), serta organisasi komunitas penerima beasiswa BIDIKMISI di ITS. Selain itu penulis juga pernah menjadi Asisten Dosen Fisika Dasar 1, Asisten Laboratorium Fisika Dasar 1 dan 2, Asisten Laboratorium Fisika Material, serta penulis juga aktif mengikuti kegiatan ilmiah nasional seperti Program Kreativitas Mahasiswa yang diadakan oleh DIKTI dan terdantai. Kritik kirim ke: [krisnamurti822@yahoo.com](mailto:krisnamurti822@yahoo.com).

***“Halaman ini sengaja dikosongkan”***